

# СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-8-23

*\*Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: kidanebab100@gmail.com*

## АЛЮМОСИЛИКАТНОЕ СЫРЬЕ ГОСУДАРСТВА ЭРИТРЕЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Аннотация.** В данном исследовании оцениваются химические, минералогические и морфологические характеристики алюмосиликатного сырья, отобранного с территории Государства Эритрея, в контексте оценки его пригодности для производства автоклавных силикатных изделий. Глинистые породы относятся к умеренно-пластичным. Преобладающими оксидами глинистых пород районов Дебуб и Мекель являются  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Для латерита характерно высокое содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , составляющее 48,40 мас. %. Преобладающими минералами этих пород являются кварц и каолинит. Вулканический пепел состоит в основном из аморфной фазы и полевого шпата. Содержание  $\text{SiO}_2$  составляет 68,83 мас. %. Оценка химического состава глинистых пород с использованием диаграммы Августиника показала, что глина региона Дебуб и вулканический пепел характеризуются соотношением  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  менее 0,2, что определяет их пригодность для производства автоклавных силикатных материалов. Латерит не пригоден для производства силикатных материалов ввиду высокого соотношения  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  0,32, однако данный параметр можно снизить при использовании дополнительно в качестве сырья вулканического пепла. Песок месторождения Дебуб пригоден для производства силикатных материалов. Большие запасы глинистых пород, вулканического пепла и песка, их химический, минеральный и дисперсный составы обуславливают 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.

**Ключевые слова:** глинистые породы, латерит, вулканический пепел, песок, известь, автоклавные силикатные материалы.

**Введение.** Основной способ, с помощью которого люди определяют эволюцию своей культуры и цивилизации – это, главным образом, архитектура их зданий и поселений. Уникальные и непревзойденные проекты зданий и сооружений в Государстве Эритрея демонстрируют изобретательность людей в адаптации к окружающей среде в дополнение к культурному самовыражению и образу жизни на протяжении тысячелетий. Традиционной практикой в эритрейском обществе было широкое использование в строительстве глинистого сырья, о чем свидетельствуют сохранившиеся древние сооружения и артефакты [1–5]. Наиболее распространенной практикой в настоящее время является использование в строительстве необожженных глиняных кирпичей, которые обладают целым рядом недостатков, таких как низкая прочность, способность впитывать влагу и разрушаться в процессе эксплуатации. Возникает необходимость в совершенствовании технологии производства экологически чистых строительных материалов, обладающих повышенными эксплуатационными показателями и доступных для массового строительства.

Геологические особенности территории Государства Эритрея определяют широкое распространение месторождений минерального сырья

для строительства, включая глины с различными геотехническими свойствами, латерит, гипс, известняк, вулканический пепел, пемзу и кварцевые пески [6–9].

Несмотря на свои небольшие размеры, Эритрея имеет очень разнообразную геологию (рис. 1). Территория делится на три основных региона: центральное и северное нагорья, протянувшиеся примерно на 340 км с севера на юг, плоские равнины западной и юго-западной низменностей и плоские прибрежные восточные равнины [10–14].

Почвы полувлажного тропического нагорья Государства Эритрея сложны и варьируются от региона к региону по текстуре, составу и другим природным характеристикам [15–19]. Большинство из них – остаточные почвы, образовавшиеся непосредственно в результате выветривания нижележащих коренных пород. По текстуре большинство почв – каменистые, суглинки, супеси или суглинистые пески. Наиболее распространенной породой являются латериты, покрывающие около 33 % суши, а основными ее компонентами являются гематит, гетит и каолинит [17]. В составе латеритов содержится в основном минералы каолинита, гетита, гематита и гиббсита, а также оксиды титана и гидратированные оксиды

алюминия, образующиеся в процессе выветривания. Кроме этого, латериты содержат кварц различной дисперсности. За счет содержащихся оксидов и гидроокислов железа латериты окрашены в красный или красно-коричневый цвет.



Рис. 1 Административные зоны Государства Эритрея

Целью работы является оценка практической значимости природного алюмосиликатного сырья Государства Эритрея для производства силикатных материалов гидротермального твердения. Для этого решалась следующая задача: исследование химического состава и физических свойств природного сырья и оценка перспективы использования его в силикатном производстве.

**Материалы и методы исследования.** В рамках исследования использовали три вида наиболее распространенных глинистых пород, вулканический пепел и кварцевый песок.

Латеритная глина (латерит) отобрана в северной части столицы Асмары административной зоны Мазкель. Число пластичности латерита  $I_p = 10$ , что позволяет отнести глину к группе умеренно пластичных и классифицировать как суглинок. Цвет породы красный.

Глина месторождения Дэбуб отобрана 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 этого месторождения 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.

Глина месторождения Мазкель отобрана в районе деревни Целот. Число пластичности породы  $I_p = 13$ , что позволяет отнести глину к группе умеренно пластичных и классифицировать как суглинок. Цвет породы желтый.

Вулканический пепел отобран вблизи деревни Эрафаиле в районе вулкана Алид. Порода имеет светло-серый цвет.

Песок отобран на месторождении Дэбуб, находящемся на территории администрации города Декемхаре в районе деревни Кейх-Кор.

Для проведения химического анализа исследуемых образцов использовали рентгенофлуоресцентный спектрометр серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции. Рентгенофазовый анализ пород проводили на дифрактометре ДРОН-2 по методу порошковых дифрактограмм. Дифференциально-термический анализ (ДТА), термогравиметрический анализ (ТГ), дифференциально-термогравиметрический анализ (ДТГ) проводили с использованием прибора NETZSCH STA 449 F3 Jupiter. Фазовый состав исследуемых материалов идентифицировали с помощью известных данных [20, 21]. Для исследования микроструктуры пород применяли сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU с использованием многомасштабной визуализации SE (вторичного электрона) и BSE (обратно рассеянного электрона) с целью оценки возможных различий в морфологии фаз. Микроскоп также оборудован устройством для проведения элементного анализа методом энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Модуль крупности песка определяли в соответствии с ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Пластичность глинистых пород определяли в соответствии с ГОСТ 5180–2015. «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

**Основная часть.** Химический состав исследуемого сырья приведен в табл. 1.

Латерит содержит оксид железа (III) 48,40 мас. %, что в 1,5 раза выше, чем содержание оксида кремния (31,66 мас. %). Это связано, вероятно, с существованием вторичных минералов, богатых железом, таких как гематит, гетит и слюдистые минералы, а также с частичным замещением алюминия железом в глинистом минеральном составе. Высокое содержание оксидов железа обеспечивает породе красный цвет. Содержание оксида алюминия составляет 17,34 мас. %, который входит в состав глинистых минералов. Потери при прокаливании составляют 10,6 мас. %, что свидетельствует о большом содержании глинистых минералов, содержащие кристаллизационную воду.

В глине месторождения Дебуб содержится большое количество свободного кварца – 36,35 мас. %. Содержание оксида железа (III) составляет небольшую величину – 3,10 мас. %. Содержание оксида алюминия составляет 19,41 мас. %, который входит в состав полевых шпатов и глинистых минералов. Порода отличается незначительной потерей при прокаливании (3,48 мас. %).

Таблица 1

## Химический состав пород

Порода	Содержание оксидов, мас. %											п.п.п
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Σ	
Латерит	31,66	17,34	48,40	0,37	0,10	0,26	0,40	0,08	–	0,35	98,96	10,6
Глина месторождения Дебуб	67,15	19,41	3,10	0,42	1,56	2,00	0,03	0,18	2,61	3,34	99,80	3,48
Глина месторождения Маэбель	55,49	30,17	8,42	0,57	1,27	1,24	0,05	0,21	0,43	1,88	99,73	9,05
Вулканический пепел	68,82	15,49	2,56	0,21	2,22	0,72	0,12	0,05	5,04	4,23	99,73	3,25
Песок месторождения Дебуб	74,10	15,42	1,26	0,15	1,18	0,60	–	0,04	3,37	3,70	99,82	0,97

Содержание оксида кремния (IV) в глине месторождения Маэбель составляет 55,49 мас. %, из которого 16,15 мас. % приходится на свободный кварц. Доля оксида алюминия и железа (III) составляет соответственно 30,17 и 8,42 мас. %. Вероятно, эти соединения определяют желтый цвет породы. Потери при прокаливании составляют 9,05 мас. %, что свидетельствует о большом содержании глинистых минералов.

Содержание SiO<sub>2</sub> в вулканическом пепле составляет 68,82 мас. %, что позволяет отнести породу к группе кислых. Для породы характерно повышенное содержание щелочей (Na<sub>2</sub>O – 5,04 мас.% и K<sub>2</sub>O – 4,23 мас. %) и высокое содержание химически связанной воды – потери при прокаливании составляют 3,25 мас. %,

Песок содержит 74,10 мас. % SiO<sub>2</sub>. Высокую долю Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15,42 мас. %) и значительное количество CaO (1,19 мас. %), Na<sub>2</sub>O (3,37 мас. %) и K<sub>2</sub>O (3,70 мас. %) можно связать с присутствием полевого шпата. Светло-коричневый цвет песка свидетельствует о наличии оксидов железа, которые составляют 1,26 мас. %. Наиболее вероятно железо присутствует в виде лимонита и гётита. Потеря массы при прокаливании составляет 0,97 мас. %.

Модуль крупности песка, по данным ситового анализа (табл. 2), составляет 2,6, что характеризует песок как крупный.

Результаты рентгенофазового и термического анализов исследуемых алюмосиликатных пород приведены на рис. 2 и 3.

Таблица 2

## 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

Основным породообразующим минералом латерита (см. рис. 2, а) является каолинит (7,161; 3,579; 2,343 Å). Отчетливый рефлекс 9,980 Å соответствует наличию в породе гидрослюда. Из оксидов железа обнаружен лимонит, гётит (4,18; 2,681 Å). Рефлексы 4,262; 3,346; 1,819 Å указывают на наличие свободного кварца, содержание которого составляет 4,98 мас. % (см. табл. 1). В породе также присутствуют монтмориллонит, хлорит, алунит и смешаннослойные минералы. Полученные данные подтверждаются результатами дифференциально-термического анализа (см. рис. 3, а). На кривой ДТА присутствуют эндотермические эффекты при 311, 496 и 577 °С и экзотермический эффект при 954 °С. Первый эндотермический эффект соответствует потере воды гидроокислами железа, сопровождающейся потерей массы образца (кривая ТГ и ДТГ). Эндотермический эффект при 496 °С связан с потерей кристаллизационной воды глинистых минералов. Эндотермический эффект при 577 °С соответ-

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

Глина месторождения Дебуб состоит преимущественно из кварца (4,27; 3,346; 1,821 Å) и полевого шпата (3,249; 3,198; 3,786 Å) (см. рис. 2, б). Рефлексы 10,163 и 7,225 Å свидетельствуют о наличии иллита и каолинита, соответственно. На кривой ДТА (см. рис. 3, б) наблюдается эндотермический эффект при 90 °С, соответствующий удалению адсорбционной воды. Экзотермический эффект при 326,8 °С связан, вероятно, 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 полиморфному превращению кварца. Незначительная потеря массы при прокаливании связана с тем, что в породе преобладают кварц и полевой шпат.

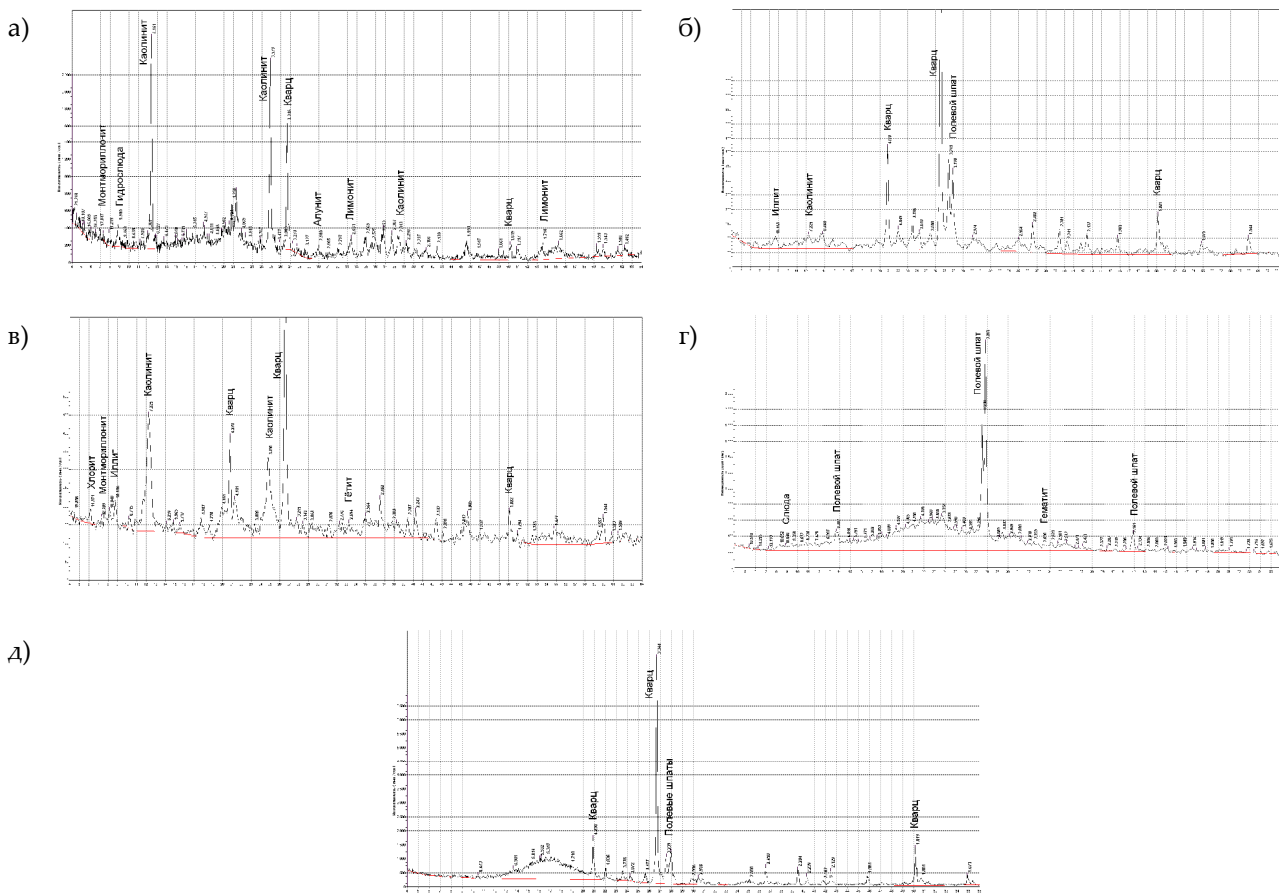


Рис. 2. Результаты рентгенофазового анализа алюмосиликатных пород:  
 а – латерит; б – глина месторождения Дебуб; в – глина месторождения Маэкуль;  
 г – вулканический пепел; д – песок месторождения Дебуб

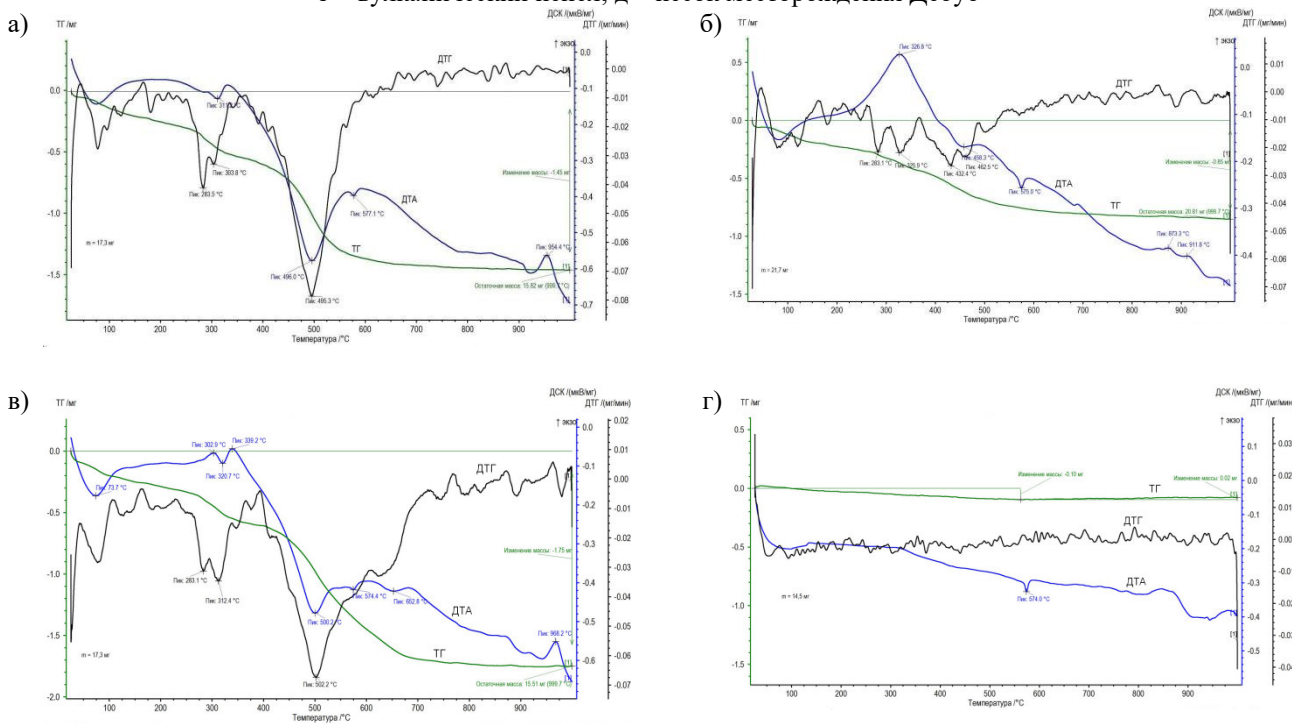


Рис. 3. Дериватограммы алюмосиликатных пород:  
 а – латерит; б – глина месторождения Дебуб; в – глина месторождения Маэкуль;  
 г – песок месторождения Дебуб

В глине месторождения Маэкуль преобладающими минералами являются кварц (4,27; 3,346; 1,821 Å) и каолинит (7,225; 3,59 Å) (см. рис. 2, в).

Железо представлено минералом гётит (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 дифференциально-термического анализа (см. рис. 3, в) наблюдается эндотермический эффект при 73,7 °С, соответствующий потере адсорбционной воды. Эндотермический эффект при 320,7 °С, сопровождающийся потерей массы, вероятно, относится к гетиту, который при обезвоживании переходит в гематит. Эндотермические эффекты при 502,2 и 574,4 °С соответствуют потере кристаллизационной воды глинистых минералов и полиморфному превращению кварца. Эндотермический эффект при 652,8 °С и экзотермический эффект при 968,2 °С подтверждают данные рентгенофазового анализа о наличии в породе монтмориллонита и каолинита, соответственно.

Рентгенофазовый анализ вулканического пепла показал, что на рентгенограмме между углами 15 и 30° наблюдается повышенный фон, соответствующий наличию аморфной фазы (см. рис. 2, г). Ярко выраженные рефлексы 6,487; 3,238; 3,203; 2,161 Å свидетельствует о наличии полевого шпата. По интенсивности рефлексов можно предположить, что в вулканическом пепле содержится преимущественно рентгеноаморфная фаза и полевой шпат. Термографический анализ вулканического пепла не проводился, так как наиболее информативные результаты показывает рентгенофазовый анализ.

В составе песка месторождения Дебуб содержится преимущественно кварц (4,258; 3,344; 1,821 Å) (см. рис. 2, д). По рефлексам 3,239; 3,198; 3,776 Å установлено содержание полевых шпатов, которые, исходя из повышенного содержания Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O и CaO, представлены албитом, микроклином и анортитом. Повышенный фон между углами 13 и 20° соответствует наличию аморфной фазы. На кривой дифференциально-термического анализа (рис. 3, г) четко выделяется только эндотермический эффект при 574 °С, соответствующий полиморфному превращению кварца. Во всем диапазоне температур масса практически не изменяется, что свидетельствует об отсутствии минералов, содержащих летучие компоненты. 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.

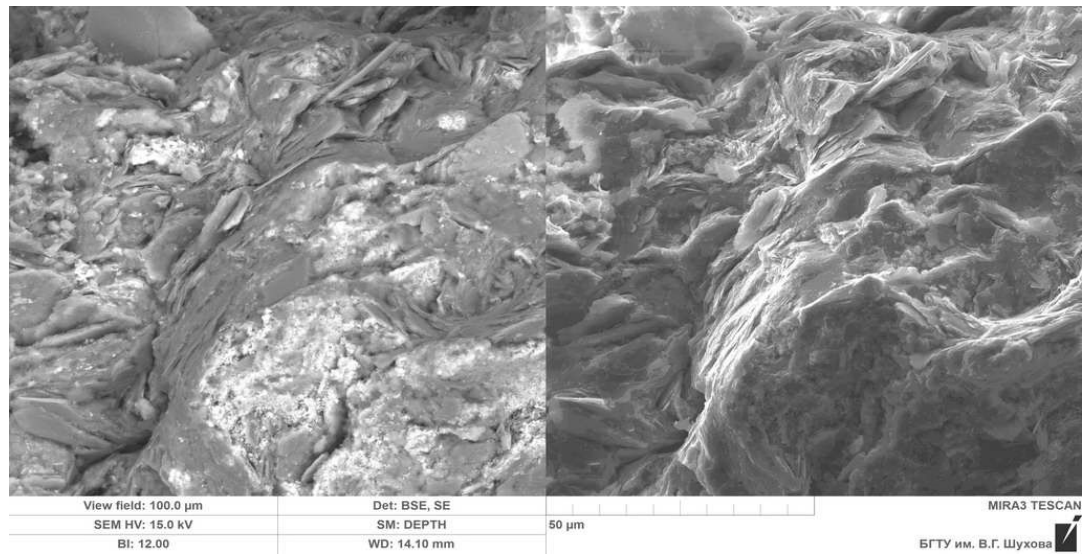
Микроструктура изучаемых пород характеризуется размером, формой и количественным соотношением частиц различного размера, а

также характером их поверхности. Латерит представляет собой рыхлый композит (см. рис. 4, а) турбулентной микроструктуры. Основная масса сложена микроагрегатами размером до 40 мкм. Микроагрегаты, имеющие сложное строение, состоят из скоплений субпараллельно расположенных кристаллов хлорита, слюды (иллита) и оксидов (Fe-Ti) (см. рис. 4, б). Пластинчатые ультрамикроагрегаты представляют собой минералы каолинита Al<sub>4</sub>[Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>](OH)<sub>8</sub> (см. рис. 4, в).

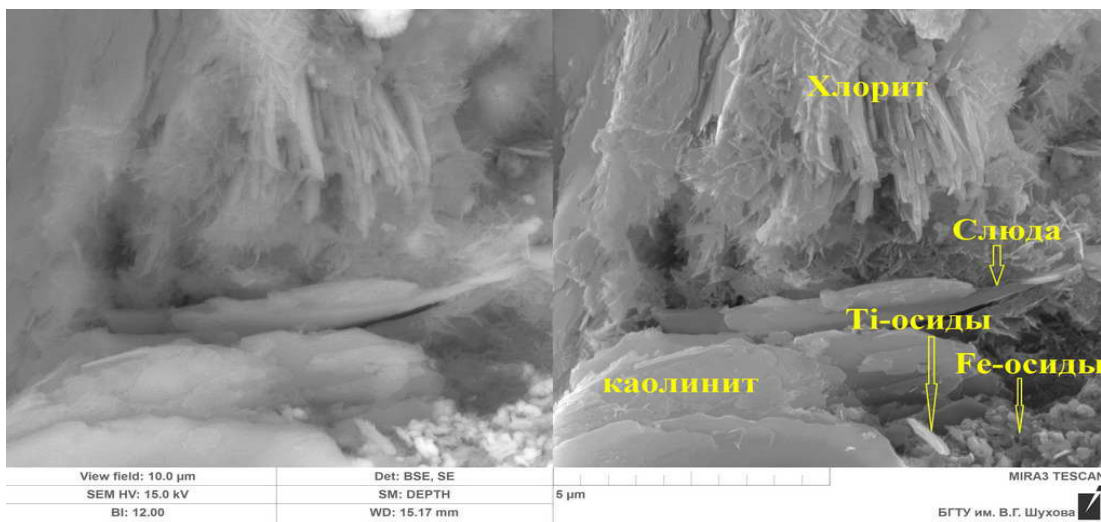
Ассоциация элементов на многослойной карте и результаты элементного анализа методом ЭДС латерита приведены на рис. 5. На многослойной карте выделяется область с высоким содержанием железа (см. рис. 5, б, область 2), которая соответствует природным минеральным агрегатам, представляющим собой смесь гидратов оксида железа (III) – лимониту FeOOH·(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>O).

В областях 5, 8 и 9 (см. рис. 5, а) по данным ЭДС преобладают элементы: кислород, кремний и алюминий, что подтверждает данные рентгенофазового и термографического анализов о наличии каолинита. В области 3 кроме кислорода, кремния и алюминия присутствует магний и калий. Можно предположить, что поверхность каолинита частично покрыта слюдой (см. рис. 5, б). В области 4 в небольшом количестве присутствует железо, что свидетельствует о наличии следов лимонита на поверхности каолинита. В области 1 преобладает кислород, алюминий, сера и калий, что позволяет предположить о наличии алунита KAl<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>. Алунит является распространенным продуктом выветривания алюмосиликатов и пирита, обычно сопровождающегося каолинизацией и силицированием. Преобладание кислорода и кремния в области б подтверждает полученные ранее данные о наличии в породе кварца.

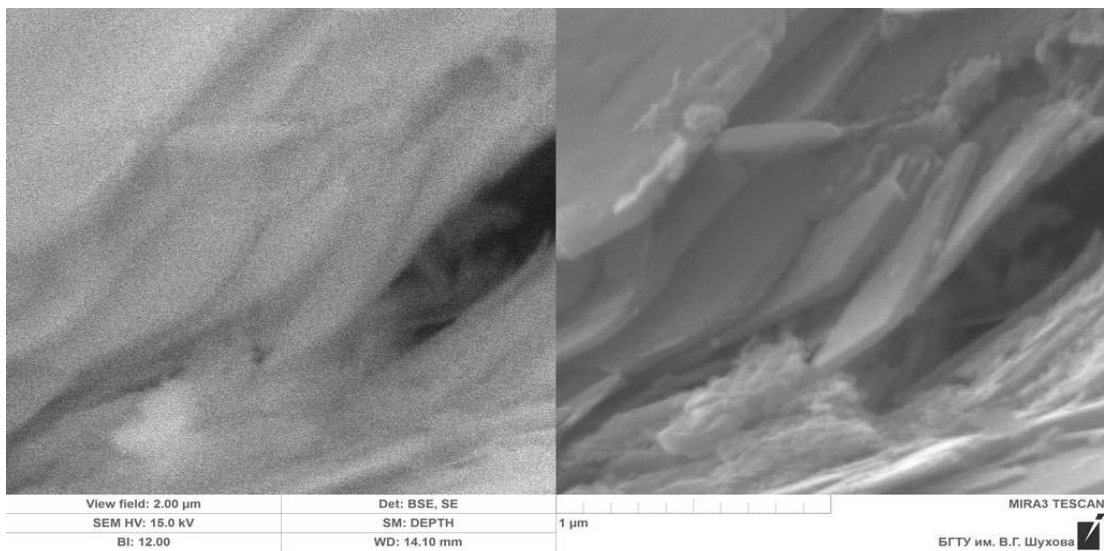
Глина месторождения Дебуб представляет собой рыхлый композит (рис. 6) скелетной микроструктуры. Основная масса сложена песчано-пылевато-глинистыми частицами размером до 25 мкм. Частицы представлены в основном зернами кварца и полевого шпата, которые формируют однородный «скелет» (см. рис. 6, а). Незначительное количество глинистых минералов не создает сплошной матрицы. Глинистые частицы создают контакты между песчаными и пылеватыми зернами. Глинистые составляющие находятся на контактах между песчаными и пылеватыми зернами и создают глинистые мостики, которые являются коагуляционными контактами (см. рис. 6, б).



а)



б)



в)

Рис. 4. Микроструктура латерита, изображение BSE и SE, РЭМ:  
а –  $\times 100$ ; б –  $\times 1000$ ; в –  $\times 10000$

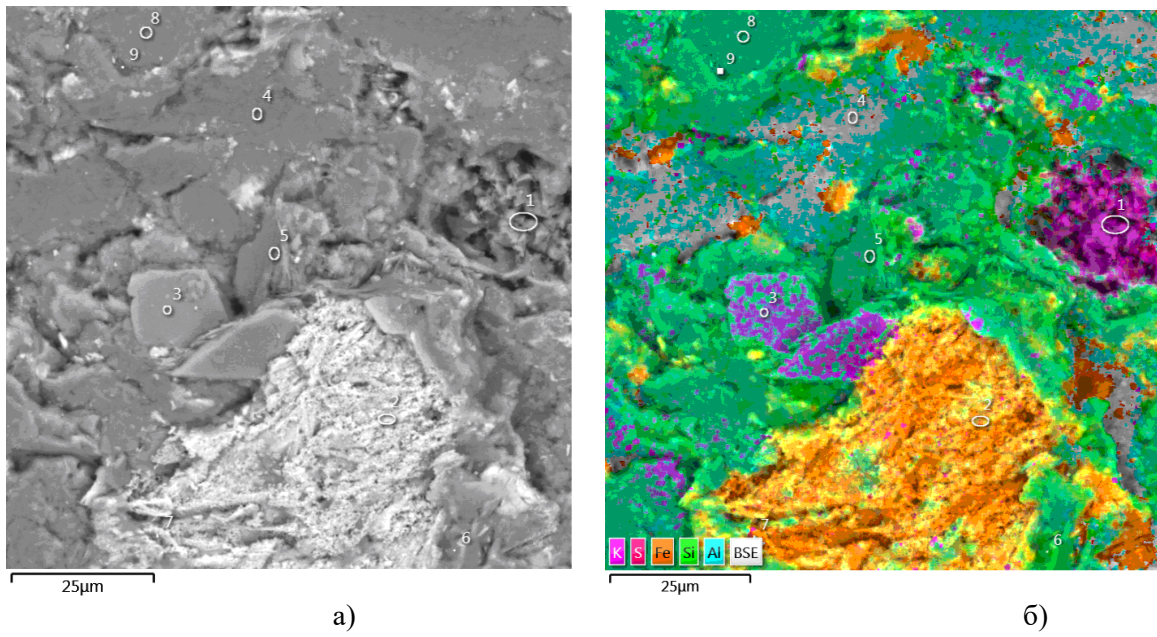


Рис. 5. Изображение BSE (а), многослойная карта (б) латерита,  $\times 1000$

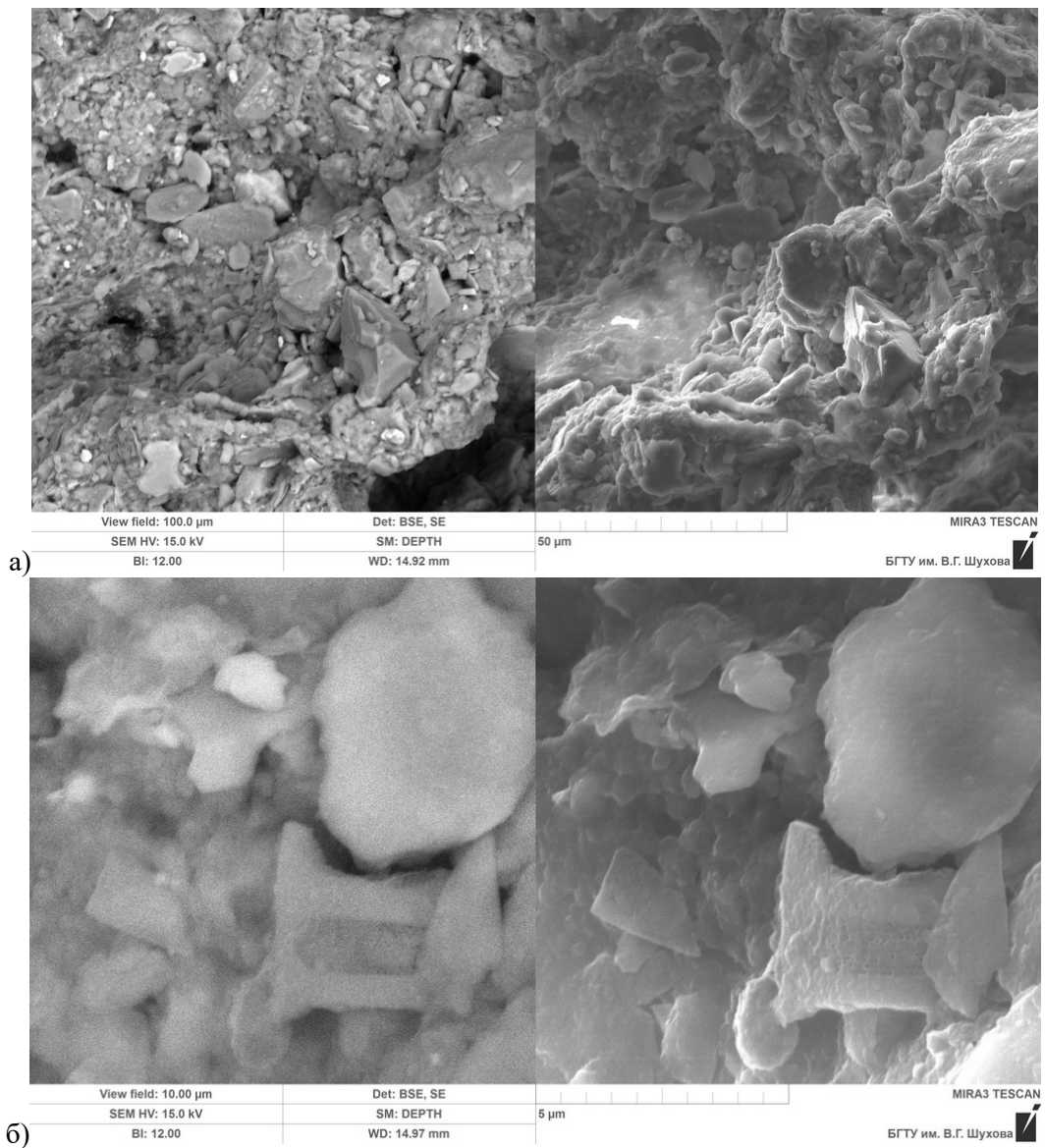


Рис. 6. Микроструктура глины месторождения Дэбуб, изображение BSE и SE, РЭМ:  
а –  $\times 100$ ; б –  $\times 1000$

Анализируя ассоциацию элементов на многослойной карте (рис. 7) и результаты анализа

спектров ЭДС глины Дэбуб, выявлено наличие элементов С, О, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti и Fe.

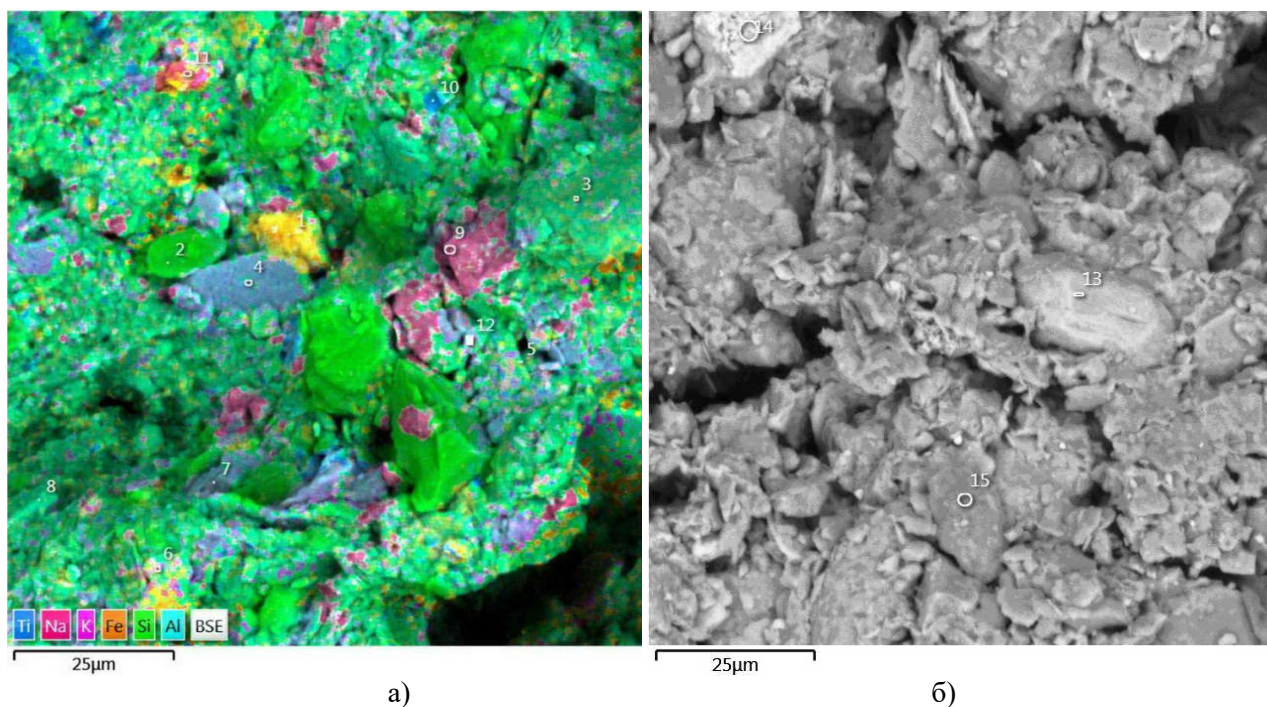


Рис. 7. Многослойная карта (а), изображение BSE (б) глины месторождения Дэбуб,  $\times 1000$

На основе данных спектров ЭДС выявлено заметное количество углерода в диапазоне от 7,29 до 15,84 ат. %, что, в первую очередь, относится к органическим растительным остаткам, что подтверждено экзотермической реакцией на кривой ДТА при температуре 326,8 °С (см. рис. 3, б). В дополнение к минералам, подтвержденным рентгенофазовым и термическим анализами, на основе спектров ЭДС можно выделить такие минералы как апатит (область 13), оксиды железа и титана (гематит и ильменит, области 1 и 14). Содержание железа в диапазоне от 0,15 % до 13,79 % наблюдалось во всех анализируемых областях, что может быть связано с его присутствием в иллите (область 6). Другими минералами, идентифицированными в породе на основе таких характеристик, как оттенок, форма, спектры ЭДС, были полевые шпаты, такие как микроклин (области 4, 7 и 12), анортит (область 8), альбит (область 9), а также кварц (область 2 и 11).

Глина Маэколь представляет собой рыхлый композит (рис. 8, а) матричной микроструктуры, характеризующийся наличием сплошной глинистой матрицы, содержащей расположенные в беспорядке песчаные зерна, которые не контактируют между собой. При большом увеличении (см. рис. 8, б) наблюдаются четко выраженные пакеты минерала каолинита. Такие глинистые породы, как правило, обладают повышенной плотностью и прочностью.

Анализируя ассоциацию элементов на многослойной карте (рис. 9) и результаты анализа спектров ЭДС глины Маэколь, выявлено наличие элементов С, О, Mg, Al, Si, P, Cl, K, Ca, Ti и Fe. Содержание углерода в породе составляет в пределах 3,23–8,79 ат. %, что, вероятно, свидетельствует о содержании небольшого количества органических растительных остатков. По данным многослойной карты и спектров ЭДС (см. рис. 9) подтверждаются данные содержания в породе кварца (область 11), каолинита (область 8), гётита (области 12, 14), иллита (область 10). Кроме этого, установлено содержание ильменита (область 13) и микроклина (область 9).

Электронно-микроскопические исследования вулканического пепла показывают, что порода является полидисперсной, между частицами отсутствует какой-либо цемент (рис. 10). Частицы пепла имеют угловатую неокатанную, часто удлиненную таблитчатую форму. Размер частиц колеблется в широком диапазоне. В небольшом количестве содержатся частицы размером 0,1–2 мм. Основная масса частиц представлена размером от 40 до 1 мкм (см. рис. 10, а и б.). Толщина плоских частиц составляет 200–300 нм. По внешнему виду частицы размером 1 мкм представляют собой агрегаты из более мелких частиц (см. рис. 10, б).



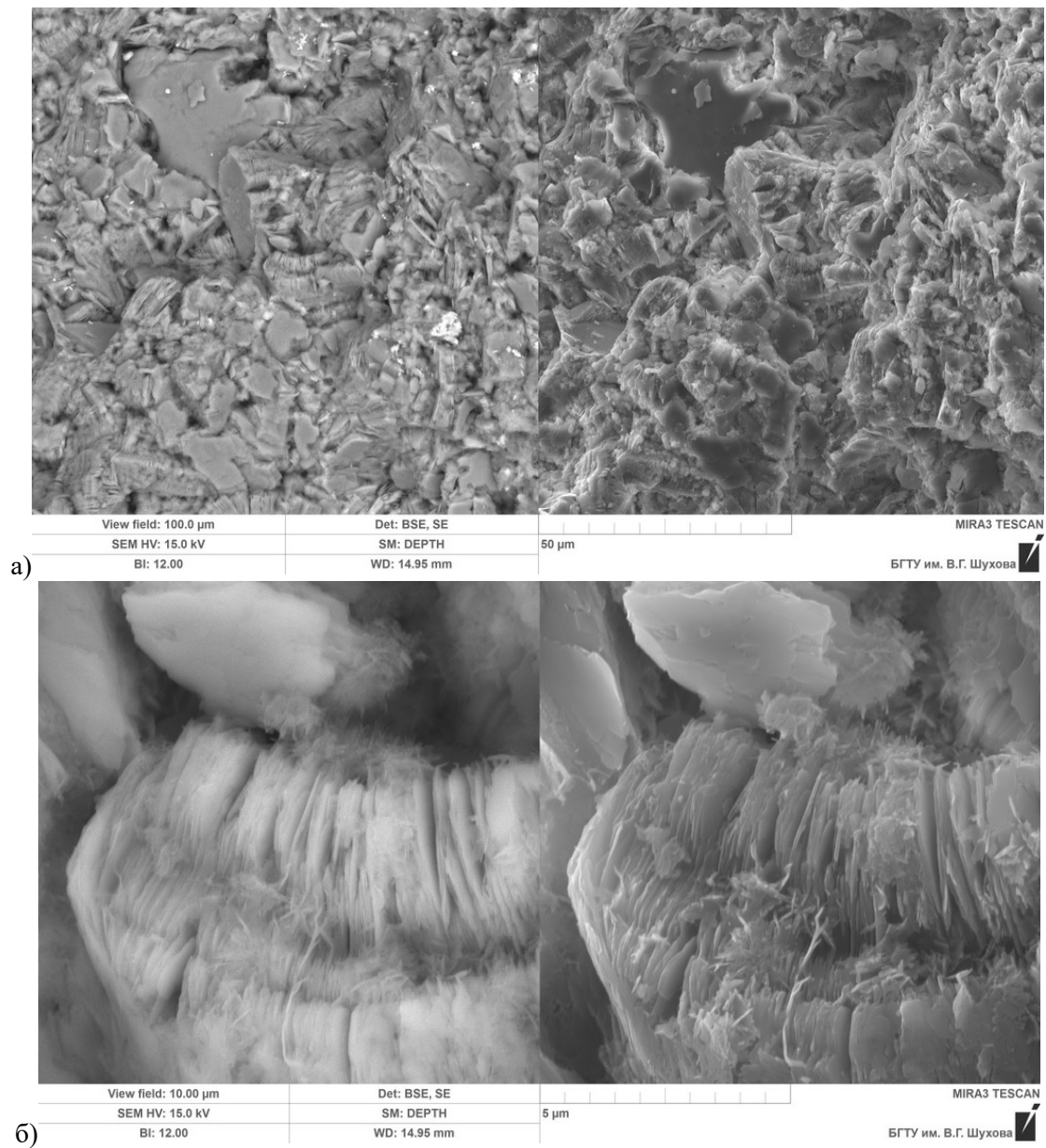


Рис. 8. Микроструктура глины месторождения Маэжель, изображение BSE и SE, РЭМ:  
а –  $\times 100$ ; б –  $\times 1000$

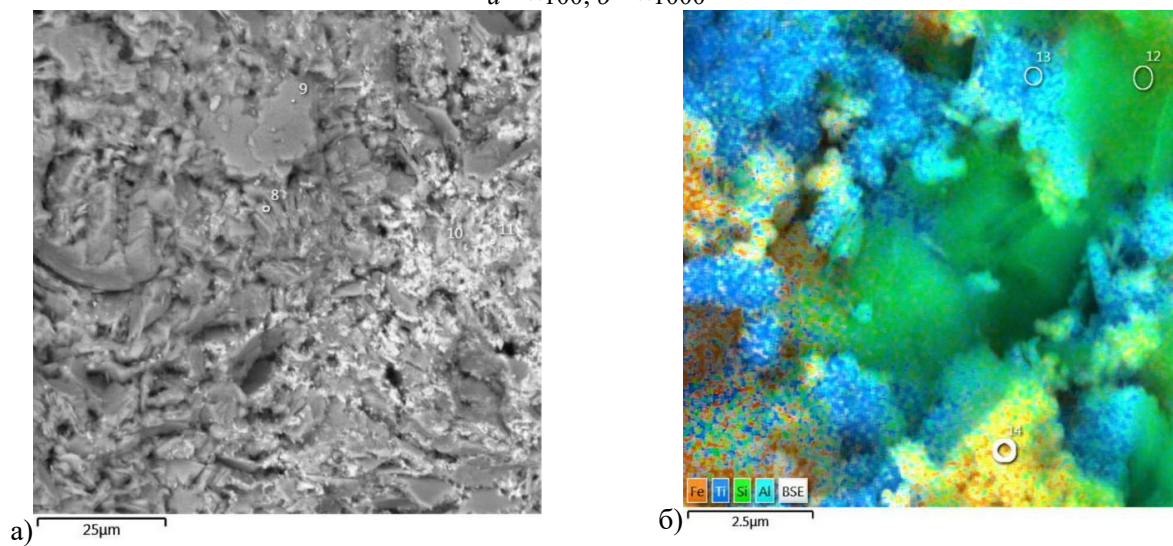


Рис. 9. Изображение BSE (а) и многослойная карта (б), глины месторождения Маэжель,  $\times 1000$

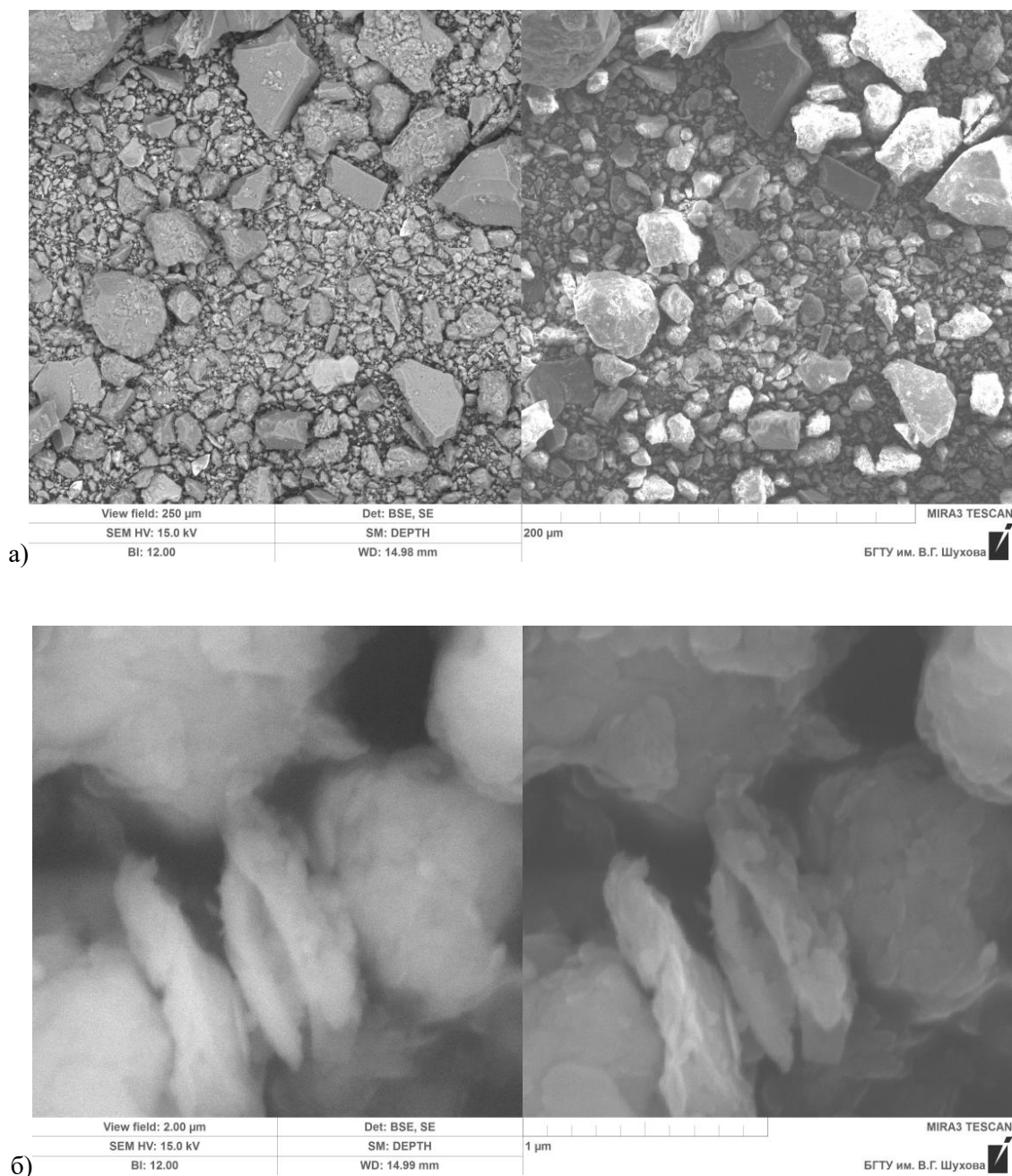


Рис. 10. Микроструктура вулканического пепла, изображение BSE и SE, РЭМ:  
*a* –  $\times 400$ ; *б* –  $\times 50000$

Микрофотографии BSE и SE и многослойная карта вулканического пепла представлены на рис. 11. Анализируя спектры ЭДС и ассоциацию элементов на многослойной карте, было выявлено наличие элементов O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn и Fe. Установлено, что порода обладает полиминеральным составом. Наблюдается присутствие кварца (см. рис. 11, области 1 и б.), полевые шпаты – микроклин  $K[AlSi_3O_8]$  (области 2, 3, 14) и анортит  $Ca[Al_2Si_2O_8]$  (область 7), слюда  $K(Mg,Fe)_3[SiO_3AlO_{10}][OH,F]_2$  (биотит, область 4), гематит  $Fe_2O_3$  (область 13), роговая

обманка из группы амфиболов  $Ca_2(Mg,Fe,Al)_5(Al,Si)_8O_{22}(OH)_2$  (область 8, 10, 12, 15), ильменит  $FeTiO_3$  (область 9, 11).

Пригодность алюмосиликатных пород по химическому составу в качестве сырья для производства строительных материалов оценивали с использованием диаграммы Августиника [22]. Положение пород на этой диаграмме по химическому составу показано в соотношении молей  $Al_2O_3/SiO_2$  и суммы молей плавней  $\Sigma R_2O + RO + Fe_2O_3$  (табл. 3, рис. 12).

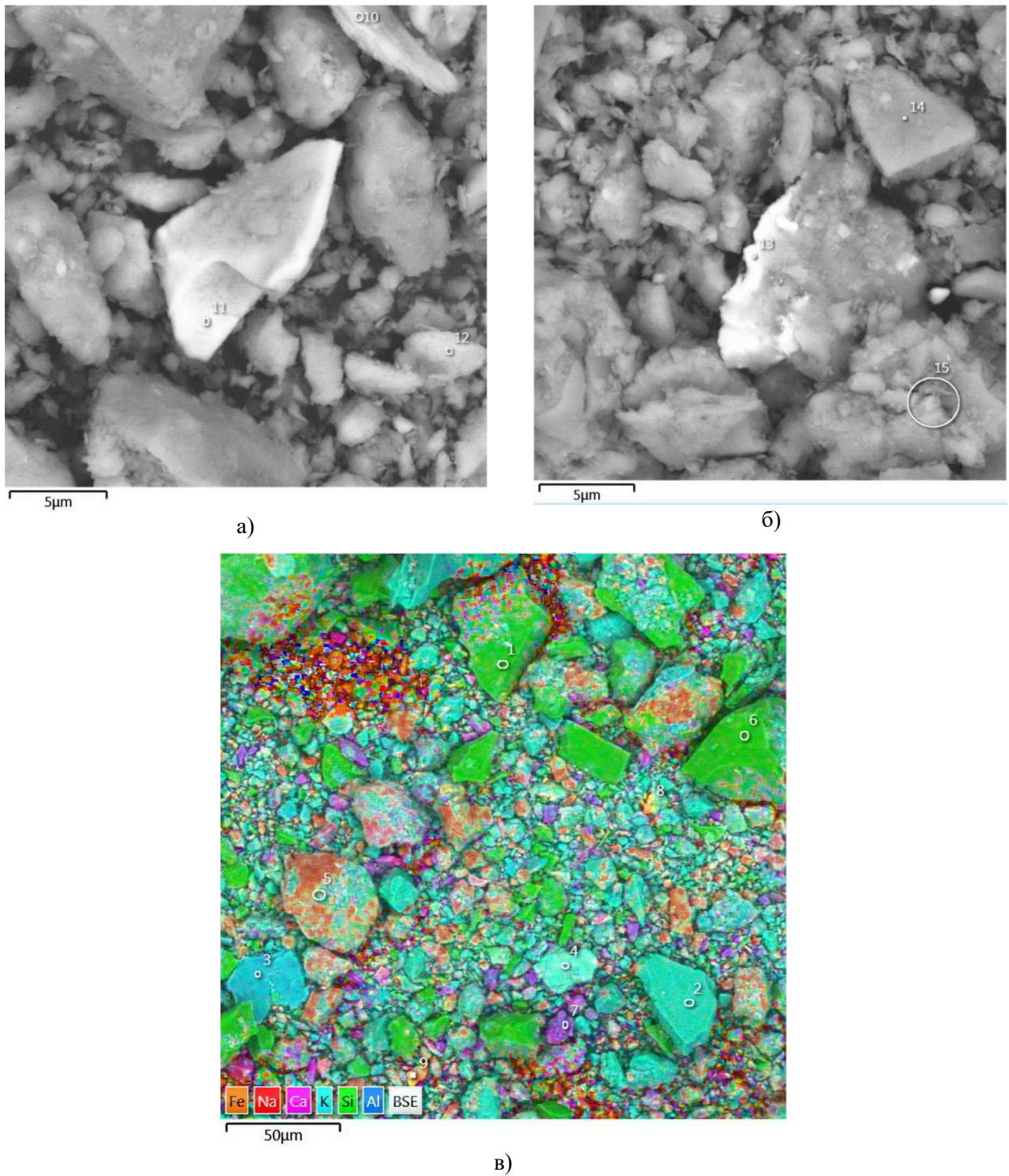


Рис. 11. Изображение BSE (а и б) и многослойная карта (в) вулканического пепла:  
а, б –  $\times 4000$ ; в –  $\times 500$

Таблица 3

**Химический состав глинистых пород в системе  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$**

№	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	Латерит	0,32	0,315
2	Глинистая порода месторождения Дзуб	0,17	0,317
3	Глинистая порода месторождения Мазкель	0,319	0,134
4	Вулканический пепел	0,133	0,2

Различные по свойствам глинистые породы занимают на этой диаграмме соответствующие участки.

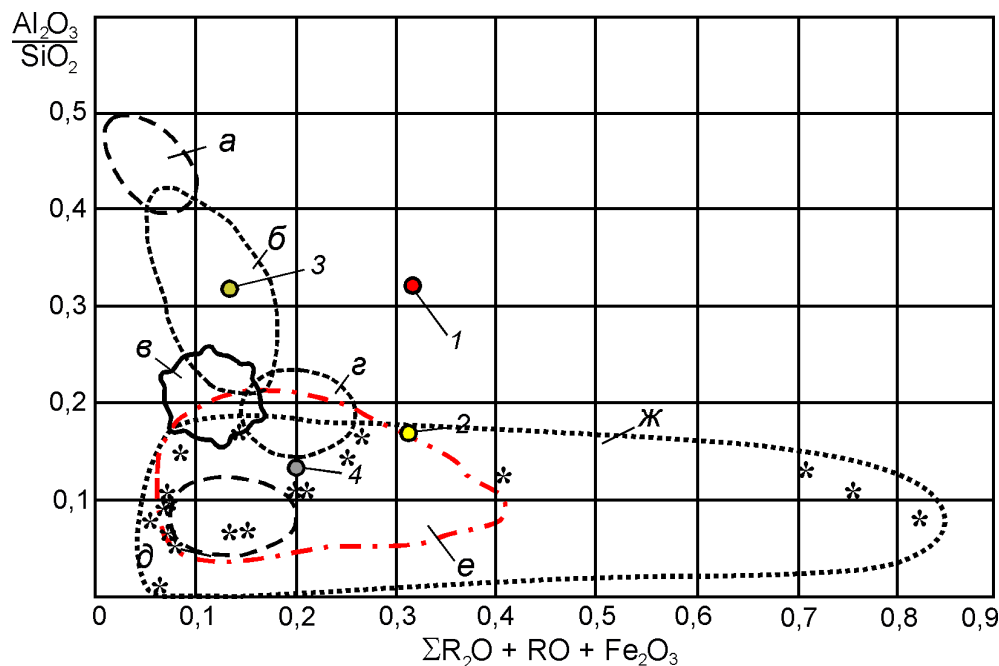


рис. 12. 1 рублировка глинистых пород в зависимости от их химического состава.

участки с составами глин пригодных для производства:

*а* – огнеупорных изделий; *б* – плиток для пола, канализационных труб, кислотоупора;

*в* – гончарных изделий; *г* – черепицы; *д* – клинкера; *е* – кирпича;

*1* – латерит; *2* – глинистая порода месторождения Дзуб; *3* – глинистая порода месторождения Маэколь;

*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 [23, 24], 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. рис. 12) обозначены положения составов изучаемого алюмосиликатного сырья. Латерит с соотношением молей  $Al_2O_3/SiO_2=0,32$  и суммы молей плавней 0,315 (точка *1*) не попадает ни в один из указанных участков с составами глин пригодных для производства строительных материалов.

Глинистая порода месторождения Дзуб и вулканический пепел (точки *3* 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 пригоден, так как в его составе отсутствуют глинистые минералы.

Глинистую породу месторождения Маэколь с соотношением  $Al_2O_3/SiO_2$  равным 0,319 и суммы молей плавней 0,134 (точка *3*) можно использовать в производстве плитки для пола, канализационных труб и кислотоупоров, однако данная порода не пригодна для производства силикатных материалов.

Таким образом, глинистая порода месторождения Дзуб пригодна для производства керамического кирпича и силикатных материалов автоклавного твердения. Из полученных данных следует, что латерит и глинистая порода месторождения Маэколь 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 смешения с вулканическим пеплом, имеющим 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.

Песок месторождения Дзуб 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.

**Выводы**

1. Показано, что Государство Эритрея, располагаясь на относительно небольшой территории, тем не менее, имеет весьма разнообразную геологию. Почвы Государства Эритрея сложны и варьируются от региона к региону по текстуре, составу и другим природным характеристикам. Большинство из них – это 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. В районе вулкана Алид находятся большие залежи вулканического пепла, которые возникли в результате извержения вулканов сотни тысяч лет назад.

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

3. 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.

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

**Источник финансирования.** 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

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Anfray F. Matara. The archaeological investigation of a city of ancient Eritrea. *Palethnologie // Archéologie et sciences humaines*. 2012. Vol. 4. Pp. 2–38.
2. Alam M.A. Rural Tourism and Its Sustainable Development. A Case Study of Zoba Debub (Eritrea) // *Asian Journal of Human Development and Livelihood*. 1997. Vol. 4. № 1. Pp. 1–15.
3. Pergola P., Ciliberti M. For an Archaeology of Religious Identity in Adulis (Eritrea) and the Horn of Africa: Sources, Architecture, and Recent Archaeological Excavations // *Journal of African Archaeology*. 2021. Vol. 1. 32.
4. Schmidt P.R., Curtis M.C. Urban precursors in the Horn: Early 1st-millennium BC communities in Eritrea // *Antiquity*. 2001. Vol. 75(290). Pp. 849–859.
5. Mehari B.B., Mayabi A.O., Kakoi B.K. Development of household defluoridation unit based on crushed burnt clay pot as sorbent medium: a case of Keren Community, Eritrea // *Environment and Natural Resources Research*. 2014. Vol. 4(3). 67.
6. Widder L. Earth eco-building: textile-reinforced earth block construction // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 122. Pp. 757–762. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.392
7. Yager T.R., Newman H. R. The mineral industry of Eritrea // *Minerals Yearbook*. 2009. Vol. 3. 15.
8. Yager T.R. Djibouti, Eritrea, Ethiopia, and Somalia // *US Geological Survey Minerals Yearbook*. 2001. Washington, DC: Department of Energy. 2002. P. 2.
9. Ekosse G.I.E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization // *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(2). Pp. 212–236.
10. Adem Esmail B. Chiara C., Jinxia W., David G., Christian A. Mapping and assessing ecosystem services for sustainable policy and decision-making in Eritrea // *Ambio*. 2023. Vol. 52. (6). Pp. 1022–1039. DOI: 10.1007/s13280-023-01841-4
11. Abbate E., Billi P. Geology and Geomorphological Landscapes of Eritrea // *Landscapes and Landforms of the Horn of Africa: Eritrea, Djibouti, Somalia*. Cham : Springer International Publishing. 2022. Pp. 41–79.
12. Derie B. M. Integration of geophysical methods for groundwater exploration in hard rock areas: application to Alla Valley, Eritrea, NE Africa : dis. Loughborough University. 2011. 250 p. DOI: 10.1016/j.ejar.2021.03.001

13. Orioli L., Molla E. L. Forest Landscape Evolution in Eritrea Throughout the Last Century – A Review // Landscapes and Landforms of the Horn of Africa: Eritrea, Djibouti, Somalia. 2022. Pp. 187–208.
14. Mekonnen G. I., H. Kazuya, T. Tommy, S. Nakamura. The Mineral Potential and Mining activities of Eritrea, and Fe-oxide and Sericite alteration mapping using the remote sensing and GIS techniques // An Internship Program at the Japan Space Systems. 2021. Pp. 1–25.
15. Ahmed A. H. Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian–Nubian Shield // Springer Nature. 2022. 520 с.
16. Drury S.A., Peart R.J., Deller M.E.A. Hydrogeological potential of major fractures in Eritrea // Journal of African Earth Sciences. 2001. Vol. 32. (2). Pp. 163–177. DOI: 10.1016/S0899-5362(01)90002-8
17. Andrews Deller M. E. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER and ALI data-examples from Eritrea and Arabia // International Journal of Remote Sensing. 2006. Vol. 27(12). Pp. 2389–2409. DOI: 10.1080/01431160600586050
18. Ekosse G.I.E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization // Applied Clay Science. 2010. Vol. 50(2). Pp. 212–236. DOI: 10.1016/j.clay.2010.08.003
19. Arshad M.A., Lowery B., Grossman B. Physical tests for monitoring soil quality // Methods for assessing soil quality. 1997. Vol. 49. Pp. 123–141.
20. Михеев В.И. Рентгенографический определитель минералов. М.: Госгеолтехиздат, 1957. 868 с.
21. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М., 1981. 334 с.
22. Августиник А.И. Керамика. Л.: Стройиздат, 1975. 592 с.
23. Володченко А.Н. Алюмосиликатное сырье для получения автоклавных отделочных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 2. С. 172–177.
24. Володченко А.Н. Научно-технологические основы использования глинистого сырья для производства силикатных автоклавных материалов : дис... д-р техн. наук: 05.16.09: защищена 21.05.18: утв. 13.12.18 / Володченко Анатолий Николаевич. Белгород, 2018. 417 с.

*Информация об авторах*

**Гхебремедхин Кидане Велдай**, аспирант. E-mail: kidanebab100@gmail.com., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

**Володченко Анатолий Николаевич**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной химии, E-mail: volodchenko@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46.

Поступила 04.12.2024 г.

© Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н., 2024

**\*Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N.**

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

*\*E-mail: kidanebab100@gmail.com.*

## ALUMINOSILICATE RAW MATERIALS OF THE STATE OF ERITREA FOR THE PRODUCTION OF SILICATE MATERIALS

**Abstract.** *This study evaluates the chemical, mineralogical and morphological characteristics of aluminosilicate raw materials selected from the territory of the State of Eritrea in the context of assessing its suitability for the production of autoclave silicate products. Clay rocks are moderately plastic. The predominant oxides of clay rocks in the Debub and Maakel areas are SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Laterite is characterized by a high content of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, amounting to 48.40 wt. %. Quartz and kaolinite are the predominant minerals of these rocks. Volcanic ash consists mainly of an amorphous phase and feldspar. The SiO<sub>2</sub> content is 68.83 wt. %. An assessment of the chemical composition of clay rocks using the Augustinik diagram showed that the clay of the Debub region and volcanic ash are characterized by an Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio of less than 0.2, which determines their suitability for the production of autoclave silicate materials. Laterite is not suitable for the production of silicate materials due to the high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> ratio of 0.32, however, this parameter can be reduced if volcanic ash is additionally used as a raw material. The sand of the Debub deposit is suitable for the production of silicate materials. Large reserves of clay rocks, volcanic ash and sand, their chemical, mineral and dispersed*

*composition make it possible to use them as raw materials for the production of silicate materials of hydrothermal hardening. The high content of iron compounds in laterite will make it possible to obtain materials with increased radiation protection properties.*

**Keywords:** *clay rocks, laterite, volcanic ash, sand, lime, autoclave silicate materials.*

## REFERENCES

1. Anfray F. Matara. The archaeological investigation of a city of ancient Eritrea. *Palethnologie. Archéologie et sciences humaines*. 2012. Vol. 4. Pp. 2–38.
2. Alam M.A. Rural Tourism and Its Sustainable Development. A Case Study of Zoba Debub (Eritrea). *Asian Journal of Human Development and Livelihood*. 1997. Vol. 4. № 1. Pp. 1–15.
3. Pergola P., Ciliberti M. For an Archaeology of Religious Identity in Adulis (Eritrea) and the Horn of Africa: Sources, Architecture, and Recent Archaeological Excavations. *Journal of African Archaeology*. 2021. Vol. 1. 32.
4. Schmidt P.R., Curtis M.C. Urban precursors in the Horn: Early 1st-millennium BC communities in Eritrea. *Antiquity*. 2001. Vol. 75(290). Pp. 849–859.
5. Mehari B.B., Mayabi A.O., Kakoi B.K. Development of household defluoridation unit based on crushed burnt clay pot as sorbent medium: a case of Keren Community, Eritrea. *Environment and Natural Resources Research*. 2014. Vol. 4(3). 67.
6. Widder L. Earth eco-building: textile-reinforced earth block construction. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 122. Pp. 757–762. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.392
7. Yager T.R., Newman H. R. The mineral industry of Eritrea. *Minerals Yearbook*. 2009. Vol. 3. 15.
8. Yager T.R. Djibouti, Eritrea, Ethiopia, and Somalia. *US Geological Survey Minerals Yearbook*. 2001. Washington, DC: Department of Energy. 2002. P. 2.
9. Ekosse G. I. E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization. *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(2). Pp. 212–236.
10. Adem Esmail B. Chiara C., Jinxia W., David G., Christian A. Mapping and assessing ecosystem services for sustainable policy and decision-making in Eritrea // *Ambio*. 2023. Vol. 52. (6). Pp. 1022–1039. DOI: 10.1007/s13280-023-01841-4
11. Abbate E., Billi P. Geology and Geomorphological Landscapes of Eritrea // *Landscapes and Landforms of the Horn of Africa: Eritrea, Djibouti, Somalia*. Cham : Springer International Publishing. 2022. Pp. 41–79.
12. Derie B. M. Integration of geophysical methods for groundwater exploration in hard rock areas: application to Alla Valley, Eritrea, NE Africa : dis. Loughborough University. 2011. 250 p. DOI: 10.1016/j.ejar.2021.03.001
13. Orioli L., Molla E. L. Forest Landscape Evolution in Eritrea Throughout the Last Century – A Review. *Landscapes and Landforms of the Horn of Africa: Eritrea, Djibouti, Somalia*. 2022. Pp. 187–208.
14. Mekonnen G. I., H. Kazuya, T. Tommy, S. Nakamura. The Mineral Potential and Mining activities of Eritrea, and Fe-oxide and Sericite alteration mapping using the remote sensing and GIS techniques. An Internship Program at the Japan Space Systems. 2021. Pp. 1–25.
15. Ahmed A. H. Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian–Nubian Shield. Springer Nature. 2022. 520 p.
16. Drury S.A., Peart R.J., Deller M.E.A. Hydrogeological potential of major fractures in Eritrea. *Journal of African Earth Sciences*. 2001. Vol. 32. (2). Pp. 163–177. DOI: 10.1016/S0899-5362(01)90002-8
17. Andrews Deller M. E. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER and ALI data-examples from Eritrea and Arabia. *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27(12). Pp. 2389–2409. DOI: 10.1080/01431160600586050
18. Ekosse G.I.E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization. *Applied Clay Science*. 2010. Vol. 50(2). Pp. 212–236. DOI: 10.1016/j.clay.2010.08.003
19. Arshad M.A., Lowery B., Grossman B. Physical tests for monitoring soil quality. *Methods for assessing soil quality*. 1997. Vol. 49. Pp. 123–141.
20. Mikheev V.I. Radiographic determinant of minerals [Radiograficheskiy opredelitel' mineralov]. M.: Gosgeoltekhizdat, 1957. 868 Pp. (rus)
21. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. Methods of physico-chemical analysis of binders [Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv]. 1981. 334 Pp. (rus)
22. Augustinik A.I. Ceramics [Keramika]. L.: Stroyizdat, 1975. 592 p. (rus)
23. Volodchenko A.N. Aluminosilicate raw materials for the production of autoclave finishing materials [Alyumosilikatnoye syr'ye dlya proizvodstva avtoklavnykh otdelochnykh materialov]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2017. No. 2. Pp. 172–177. (rus)
24. Volodchenko A.N. Scientific and technological foundations of the use of clay raw materials

for the production of silicate autoclave materials  
[Nauchno-tekhnologicheskiye osnovy  
ispol'zovaniya glinistogo syr'ya dlya proizvodstva

silikatnykh avtoklavnykh materialov]: dis... Doctor  
of Technical Sciences: 05.16.09: defended 05.21.18:  
approved 13.12.18. Belgorod, 2018. 417 p. (rus)

---

*Received 04.12.2024*

**Для цитирования:**

Гхебремедхин К.В., Володченко А.Н. Алумосиликатное сырье государства Эритрея для производства силикатных материалов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-8-23

**For citation:**

Ghebremedhin K.W., Volodchenko A.N. Aluminosilicate raw materials of the state of Eritrea for the production of silicate materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 8–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-8-23