



УДК 549.76: 902/904

DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-1-4

## ПЕРЕРАБОТКА ГИПСОВОГО СЫРЬЯ В АДМИНИСТРАТИВНО-КУЛЬТОВОМ ЦЕНТРЕ БРОНЗОВОГО ВЕКА ГОНУР-ДЕПЕ (ЮГО-ВОСТОЧНЫЕ КАРАКУМЫ)

Л.Я. Кабанова, А.М. Юминов, И.А. Блинов

*Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; kablar39@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 27.06.2023 г., после доработки 04.12.2023, принята к печати 08.02.2024 г.

**Аннотация.** На основании изучения минерального состава и текстурно-структурных особенностей образцов древней вяжущей смеси, использовавшейся на строительных работах в административно-культовом центре бронзового века Гонур-депе (Юго-Восточные Каракумы), реконструирована технология ее приготовления. Основой материала являются тонкие призматически-угловатые и волокнистые агрегаты восстановленного гипса (60–70 % и  $\beta$ -бассанита (3 %), связанные глинисто-кремнистым цементом (20–30 %). В смеси присутствуют зерна кварца (5–10 %), полевого шпата (до 1 %), слюды (до 1 %) и других минералов. Сырьем для получения смеси служил раздробленный природный гипсовый камень, который прокаливался на воздухе. В этом случае гипс преобразуется в  $\beta$ -бассанит и, частично, ангидрид. Морфология и размеры частиц минералов подтверждают наличие стадии прокаливания до 200 °С. Последующая добавка в сухую смесь воды вызывала быстрое загустение и цементацию материала, который можно было использовать для побелки и штукатурки стен.

**Ключевые слова:** археологическая минералогия, гипс, древние вяжущие смеси.

**Финансирование.** Исследования выполнены при поддержке государственной бюджетной темы № 122062100023-5. Полевой материал собран в составе Маргианской археологической экспедиции Института этнологии и антропологии РАН (ИЭА РАН, г. Москва, Россия) в рамках Соглашения о сотрудничестве между ИЭА РАН и Министерством культуры Туркменистана.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность коллегам из ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН за содействие в проведении анализов и помощь при интерпретации полученных результатов.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с рукописью.

**Вклад авторов.** Л.А. Кабанова, А.М. Юминов – разработка концепции, исследование, визуализация, написание черновика рукописи, редактирование финального варианта рукописи; И.А. Блинов – аналитические/экспериментальные работы. Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией.

**Для цитирования:** Кабанова Л.Я., Юминов А.М., Блинов И.А. Переработка гипсового сырья в административно-культовом центре бронзового века Гонур-депе (Юго-Восточные Каракумы). Минералогия, 10 (1), 54–66. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-1-4.

## PROCESSING OF GYPSUM-BEARING MATERIALS IN THE BRONZE AGE GONUR DEPE ARCHEOLOGICAL SITE (SOUTHEAST KARAKUM DESERT)

L.Ya. Kabanova, A.M. Yuminov, I.A. Blinov

*South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology UBRAS,  
Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia; kablar39@mail.ru*

Received 27.06.2023, revised 04.12.2023, accepted 08.02.2024

**Abstract.** The technology of preparation of an ancient binder mixture used in construction work at the Gonur Depe archeological site (Southeast Karakum desert) is interpreted on the basis of study of its mineral

composition and textural-structural features. The material is composed of thin prismatic-angular and fibrous aggregates of reduced gypsum (60–70 %) and  $\beta$ -bassanite (3 %) enclosed in clay-siliceous matrix (20–30 %). The mixture also contains grains of quartz (5–10 %), feldspar (up to 1%), mica (up to 1 %) and other minerals. The mixture was produced from a crushed natural gypsum stone, which was calcinated in air. In this case, gypsum is converted to  $\beta$ -bassanite and partly to anhydride. The morphology and sizes of mineral particle confirm the presence of the calcination stage up to 200 °C. The further addition of water to a dry mixture caused rapid thickening and cementation of the material, which could be used for whitewashing and plastering of the walls.

**Keywords:** archeological mineralogy, gypsum, ancient plaster mixes.

**Funding.** This work was supported by state contract no. 122062100023-5. The field materials were collected in structure of the Margiana Archeological Expedition of the Institute of Ethnology and Anthropology RAS (IEA RAS, Moscow, Russia) in frame of the Collaboration between the IEA RAS and Ministry of Culture of Turkmenistan.

**Acknowledgements.** The authors are grateful to colleagues from the South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS for analytical works and help in interpretation of results.

**Conflict of interest.** The authors declare that they have no conflicts of interest.

**Author contribution.** L.A. Kabanova, A.M. Yuminov – conceptualization, investigation, visualization, writing – original draft, writing – review & editing; I.A. Blinov – analytical/experimental works. All the authors approved the final version of the manuscript prior to publication.

**For citation:** Kabanova L.Ya., Yuminov A.M., Blinov I.A. Processing of gypsum-bearing materials in the bronze age Gonur Depe archeological site (Southeast Karakum Desert). *Mineralogy*, 10 (1), 54–66. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-1-4.

## ВВЕДЕНИЕ

Гонур-депе является одним из наиболее известных археологических памятников эпохи поздней бронзы в Средней Азии. Он находится в юго-восточной части пустыни Кара-Кум, в 70 км севернее современного г. Байрамали (Марыйский вেলাят, Республика Туркменистан) (рис. 1). Памятник был открыт В.И. Сарияниди в 1972 г. и раскапывался им до последних лет жизни. В настоящее время археологические работы продолжают сотрудники Маргианской археологической экспедиции. За период многолетних работ научным коллективом были собраны и изучены богатейшие коллекции изделий из камня, керамики, меди, бронзы и драгоценных металлов.

Гонур-депе был основан в конце III тыс. до н.э. в замковой части дельты р. Мургаб (Зайцева и др., 2008). Он просуществовал до середины II тыс. до н.э. и был покинут своими жителями в результате ухода реки. Объект относится к Бактрийско-Маргианскому археологическому комплексу и в древности являлся крупнейшим административно-культурным центром прилегающей территории (Сарияниди, 1974). Протогород был окружен несколькими массивными оборонительными стенами, усиленными прямоугольными башнями и славился монументальной архитектурой. Хозяйство его жителей базировалось на орошаемом земледелии (Сатаева, Сатаев, 2012), скотоводстве (Сатаев, Сатаева, 2012)

и многочисленных ремеслах: гончарном деле (Кожин, 2008), обработке каменного сырья (Юминов, 2012), металлургическом и бронзолитейном производстве (Папахристу, 2016; Kraus, 2016; Yuminov et al., 2021). Немаловажную часть в его развитии занимала торговля, в том числе оловянными и медными рудами. Последние в то время уже разрабатывались на территории Средней и Центральной Азии (Avilova, 2008; Steinkeller, 2014) и через Гонур-депе экспортировались в древние государства Ближнего Востока (Lyonne, 2005).

Цель настоящих исследований состояла в воссоздании процессов изготовления древних штукатурно-гипсовых смесей, используемых при строительстве административно-культурного центра Гонур-депе. В задачи исследований входили макро- и микроописание светло-серого артефакта с волнистой поверхностью в нижней части, определение его минерального состава и характеристика текстурно-структурных особенностей материала.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследований был обнаружен в раскопе № 19, погребение 24, и идентифицирован как фрагмент отпечатка плетеной корзины, оставленной на гипсе. Лабораторные исследования включали оптическую и электронную микроскопию, рентгенофазовый и изотопный анализы, которые выполнены на приборной базе Южно-Уральского



Рис. 1. Местоположение объектов на территории Туркменистана. 1 – современные населенные пункты, 2 – место раскопок археологического комплекса Гонур-депе.

Fig. 1. Location of objects on the territory of Turkmenistan. 1 – modern settlements, 2 – the excavation site of the Gonur-depe archaeological complex.

федерального научного центра минералогии и геоэкологии УрО РАН (г. Миасс). Прозрачные шлифы и полированные аншлифы изготовлены в шлифовальной мастерской (шлифовальщики И.В. Кислюк, Н.П. Иванова).

Оптическая микроскопия в проходящем плоско-поляризованном свете проводилась в целях диагностики и определения текстурно-структурных особенностей строения образцов, а также для отбора монофракций. Для макроскопического описания использовались бинокулярный микроскоп МБС-10. Петрографическое изучение осуществлялось с помощью поляризованного микроскопа Axiolab ZS с цифровой фотопроставкой.

Электронная микроскопия задействовалась для установления размеров, морфологии (форм выделения) и диагностики тонких агрегатов минералов. Съемка проводилась на растровом электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU, оборудованном энергодисперсионной приставкой OXFORD INSTRUMENT. Условия съемки: напыление – графит, напряжение на катоде – 30 кВ, диаметр пучка – 5 мкм, время экспозиции – 60 сек.

Рентгенофазовый анализ использовался для количественного определения минерального состава (объем. %). Препараты для исследований готовились на вазелиновой основе во избежание

потери водорастворимых фаз. Анализ проводился в воздушно-сухом состоянии на автоматизированном дифрактометре ДРОН-2М, Си-К $\alpha$  излучении с графитовым монохроматором, шаг съемки 0.02° (аналитик П.В. Хворов). Содержания рассчитаны методом Петера-Кальмана по экспериментально полученным коэффициентам на 100 % без учета рентгеноаморфной составляющей.

Изотопный состав серы в гипсе определен на масс-спектрометре Delta<sup>Plus</sup> Advantage, сопряженном с элементным анализатором EA Flash 1112 интерфейсом ConFlo III (производитель Thermo Finnigan) (аналитик С.А. Садыков). Изотопные отношения измерены в непрерывном потоке газа. Масса навески – 0.2 мг. При анализе использовался стандарт NBS-123. Обработка результатов и контроля работы масс-спектрометра производилась с помощью программного обеспечения Isodat 2.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### Макроскопическое описание артефакта

Изученный образец представляет собой трапециевидный фрагмент гипсового слепка донца и части боковой стенки плетеной корзины. Размеры образца (см): длина 21–22; ширина 10–12; высота 4–5 (рис. 2).

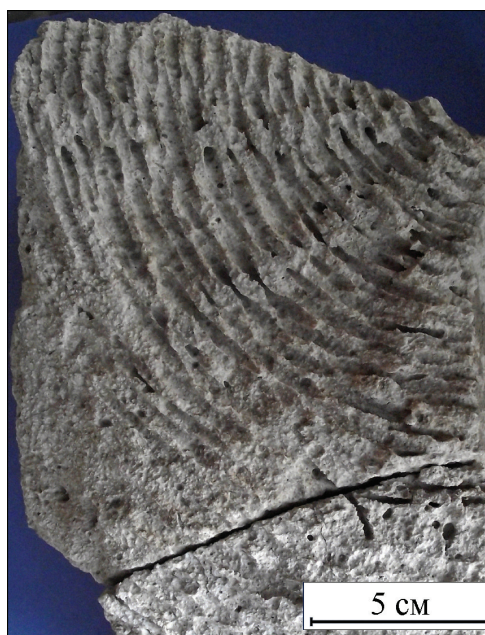


Рис. 2. Отпечаток дна плетеной корзины из ивовых прутьев, оставленный на вяжущем гипсовом материале в центре Гонур-депе.

Раскоп № 19, погребение 24; обр. ГД-153-9.

Fig. 2. Imprint of the bottom of a wicker basket made of willow twigs on a binding plaster material at the Gonur Depe archeological site.

Excavation no. 19, burisl 24; sample GD-153-9.



На отпечатке хорошо выделяется крестовина, состоящая из четырех парно-переплетенных прутьев, которые плотно оплетаются лозой. Дно и боковые стенки корзины выполнены простым послойным плетением, в котором одиночные прутья в виде непрерывной ленты через стойку вплетались и наслаивались рядами по пологой спирали. Толщина прутьев не превышала 5–7 мм. По определению Л.В. Сатаевой для лозы использовались прутья ивы.

Судя по отпечаткам, материал заполнения изначально был пластичным, а затем затвердел и превратился в плотную камнеподобную массу светло-серого цвета. Ее поверхность со временем покрылась тонкой (менее 1 мм) серо-коричневой коркой патины, так называемого «пустынного загара», который образуется при длительном нахождении образца на дневной поверхности. Макротекстура образца однородная без видимой слоистости. Структура неравномерная тонко- и скрытозернистая, пористая. Поры имеют угловатую и овальную форму поперечником 0.5–4.0 мм. Они расположены беспорядочно и занимают около 25 об. %. Материал непрозрачен и имеет матовый блеск. Он относительно хрупкий, легкий, не обладает магнитными свойствами. С соляной кислотой практически не взаимодействует, за исключением слабой реакции на заветренной поверхности.

### Петрографическая характеристика

Микроскопически образец характеризуется обломочным строением. Обломки составляют око-

ло 70 об. %. Они представлены тонко сросшимися агрегатами гипса, мелкими зернами кварца, реже плагиоклаза, чешуйками слюды и единичными включениями эпидота и цоизита, а также комковатыми стяжениями кремнисто-глинистых и глинисто-кремнистых агрегатов. Обломки неравномерно распределены в объеме и образуют скопления, в основном, приуроченные ко дну корзины (рис. 3а). Они характеризуются округлой, округло-овальной, реже угловатой формой (рис. 3б). Размер обломков колеблется от 0.1 до 1.5–2.0 мм. Доля цемента в образце достигает 30 %. Граница с обломками не всегда отчетливо проявлена, что объясняется близким составом цемента и большей части обломков.

В комковатых стяжениях отмечается переменное содержание компонентов. Встречаются обособления, сложенные агрегатом мелких зерен кварца, часто остроугольной формы, чешуек мусковита и глинисто-кремнистого вещества (рис. 4а, б). Такие обособления составляют около 5 об. %. Гипсовая составляющая в них преобладает над зернами кварца. Цемент в этих обломках также глинисто-гипсовый, типа выполнения пор.

Границы между стяжениями и цементом могут быть резкими (рис. 4в) или «размытыми» (рис. 4г). В первом случае граница может быть подчеркнута рассеянным органическим веществом, во втором – переход постепенный.

Основная цементирующая масса представлена глинисто-кремнистым веществом, местами, с резким преобладанием опаловой составляющей, выполняющей стенки пор. Структура цемента пе-



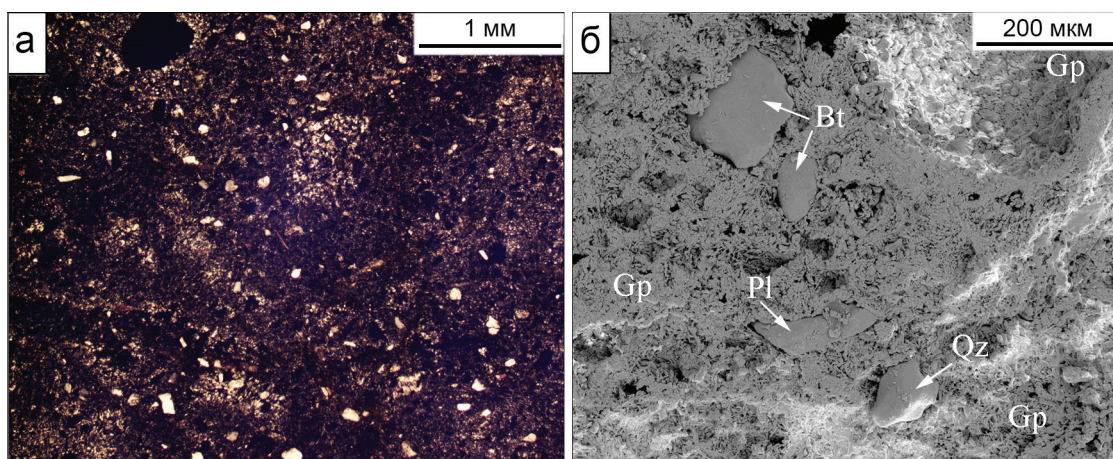


Рис. 3. Обломочный материал в гипсовом слепке: а – скопление обломков минералов в цементе (проходящий свет, без анализатора); б – зерна минералов в гипсовом матриксе (СЭМ-фото).

Здесь и далее: Pl – плагиоклаз, Bt – биотит, Gp – гипс, Qz – кварц.

Fig. 3. Clastic material in a plaster cast: а – fragments of minerals in matrix (transmitted light, without analyzer); б – mineral grains in gypsum matrix (SEM photo).

Hereinafter: Pl – plagioclase, Bt – biotite, Gp – gypsum, Qz – quartz.

литовая, местами алевропелитовая. Тип цемента неоднородный: местами – базальный, чаще – типа заполнения пор. Текстура материала, в целом, пористая. Поры составляют около 25 об. %. Их размер варьирует от 0.01 до 0.5–1.0 мм. Расположение пор хаотичное, они встречаются как в цементе, так и комковатых стяжениях (рис. 4). В цементе поры обычно полые, редко выполненные более поздним опалом (рис. 4а). В гипсовых стяжениях количество пор повышенное, и они полностью заполнены опалом (рис. 4б). В цементе отчетливо проявлены трещины усыхания, подчеркнутые темно-бурым органическим веществом (рис. 4в). Местами к ним приурочены выделения вторичного опала (рис. 4г).

Исследования с помощью сканирующего электронного микроскопа позволили выявить в наполнителе корзины органическое вещество, в том числе и реликты водорослей, которые по форме, строению и составу предположительно относятся к диатомовым. Водоросли образуют буроватые цепочечные колонии, состоящие из мелких одноклеточных индивидов размером от 1–2 до 50 мкм. Клетка протопласта покрыта пектиновой оболочкой, заключенной в опаловом цементе с отчетливым тонким рисунком среза пор и ареол (рис. 5а). Поскольку диатомовые водоросли встречаются не только в морских и пресноводных водоемах, а также в воздушной, наземной и почвенной среде, проникая на глубину до 3 м (Голлербах, 1951), возможно, что фрагмент изученной корзины был захоронен в почве или вблизи водоема.

В составе наполнителя также присутствует рассеянное органическое вещество, которое по размеру и морфологии представлено двумя типами. Первый тип – дисперсные включения, которые наблюдаются в проходящем свете в виде бурых или черных частиц размером менее 0.005 мм, сходных по красновато-бурой окраске с гидроксидами железа. Они слабо различаются под микроскопом, находятся в виде отдельных частиц или образуют пылеватые скопления (рис. 5б). Обычно они располагаются беспорядочно, но нередко выполняют поры и трещины в комковатых обломках и между ними (рис. 5в). Рассеянное органическое вещество второго типа – детритное, обладает собственной формой в виде микростружков, микропрожилков, нитевидных включений размером от 0.01 до 0.10 мм.

### Минеральный состав

По данным рентгенофазового анализа образец состоит из гипса (60–70 %), кварца (до 10 %) и бассанита (3–5 %) (рис. 6). При микроскопическом изучении были также идентифицированы плагиоклаз, мусковит, биотит, эпидот и цоизит, количество которых не превышает 0.3–0.5 мас. % (чувствительность рентгеноструктурного метода).

Гипс представлен обломками природного гипсового камня в комковатых обособлениях и в цементе и новообразованными агрегатами в полостях и пустотах. Для обломочного гипса характерны мелкие зернистые агрегаты или сростки плохо



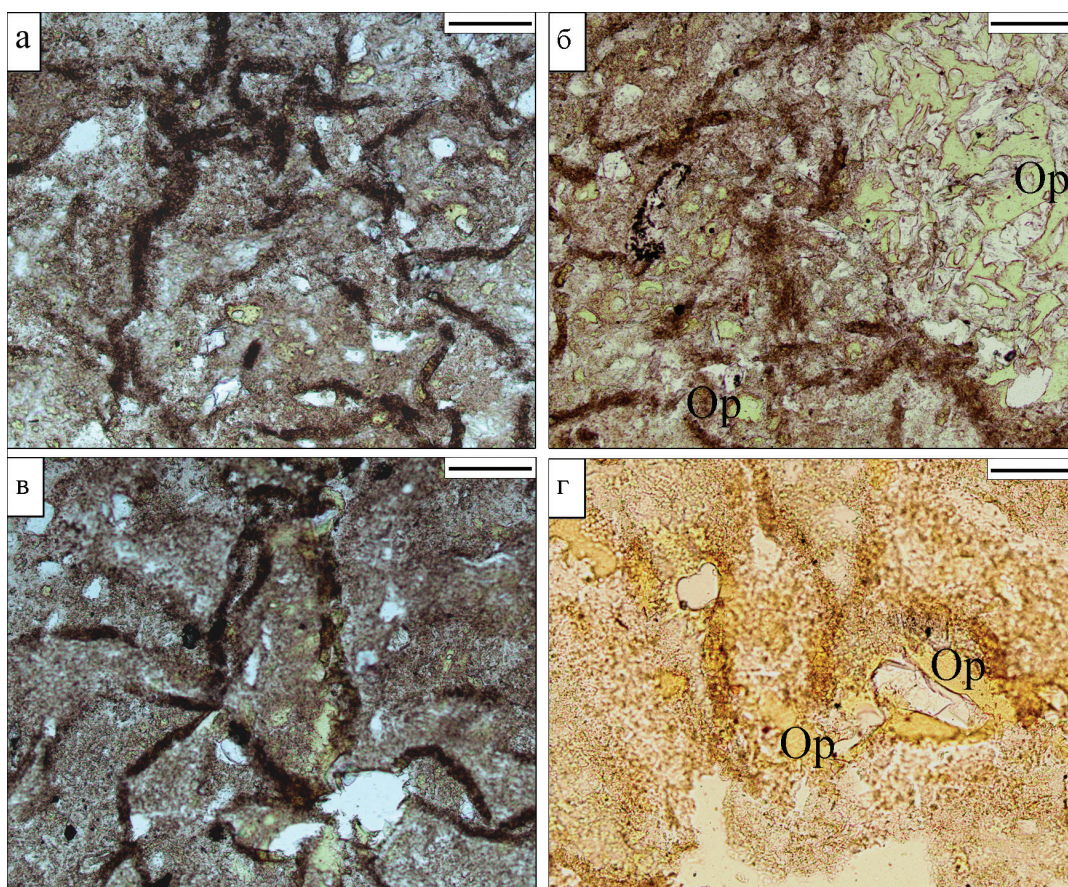


Рис. 4. Поры и трещины усыхания в глинисто-гипсовой массе: а – цементирующая масса со стяжениями гипса (серое) и порами (светло-серое), частично заполненными опалом (темно-серое до черного); б – гипсовые стяжения с порами, полностью заполненными опалом (Op) и трещины усыхания с буровато-коричневым органическим веществом; в – цементирующая масса с редкими порами и трещины усыхания с органическим веществом; г – участки с опалом (желтоватый), приуроченным к трещинам с органическим веществом (коричневое).

Проходящий свет: с анализатором (а, в), без анализатора (б, г). Масштаб 200 мкм.

Fig. 4. Pores and syneresis cracks in clay-gypsum mass: а – matrix with gypsum aggregates (gray) and pores (light gray) partly filled with opal (dark gray to black); б – gypsum aggregates with pores completely made of opal (Op) and syneresis cracks with brownish organic matter; в – matrix with rare pores and syneresis cracks with organic matter; г – areas with opal (yellowish) confined to cracks with organic matter (brown).

Transmitted light: with (а, в) and without (б, г) analyzer. Scale bar is 200  $\mu\text{m}$ .

оформленных кристаллов с рельефной поверхностью (рис. 7а). В пустотах он образует призматические и игольчатые образования, наросшие на стенки (рис. 7б) или волокнистые и лучистые агрегаты (рис. 7в). В шлифе гипс бесцветен. В скрещенных николях имеет серую интерференционную окраску первого порядка. Размер отдельных агрегатов варьирует в широких пределах, однако большая часть зерен не превышает 5–15 мкм.

Бассанит ( $\text{Ca}[\text{SO}_4] \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) является продуктом конверсии (переработки) гипса и образует псевдоморфозы по нему. Под микроскопом бассанит практически неотличим гипса, кроме того он имеет близкий химический состав. В шлифе мине-

рал наблюдается в виде мелких зерен и лучистых сростков, заполняющих поры и трещины (рис. 7в).

Кварц представлен остроугольными зернами и обломками с округло-овальными краями размером от 0.01 до 0.20 мм (рис. 8а). Большая часть зерен характеризуется однородным погасанием, реже – волнистым. Некоторые зерна содержат следы хрупкой деформации, выраженной в трещинах, которые заполнены глинисто-гипсовым веществом. Отдельные зерна переполнены микровключениями слюд, а также флюидными включениями (рис. 8б). В придонной части слепка содержание кварца заметно увеличивается относительно его верхней части.



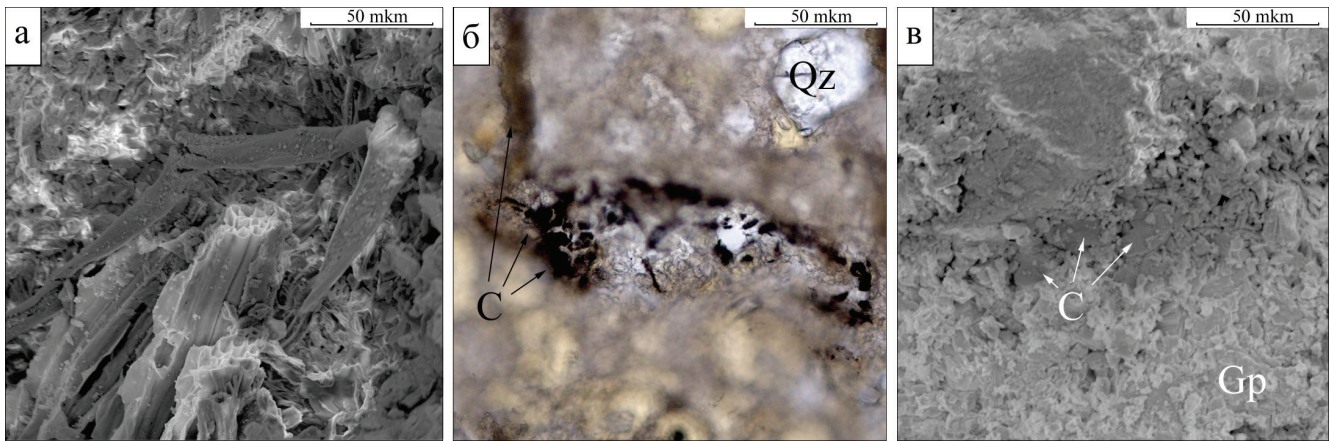


Рис. 5. Включения органического вещества в гипсовом материале: а – фрагменты диатомовой водоросли; б – детрит (С) в трещинах усыхания (проходящий свет без анализатора); в – дисперсное органическое вещество (С) в порах гипсового матрикса (Gp).

Fig. 5. Inclusions of organic matter in gypsum material: а – fragments of diatoms; б – detritus (C) in syneresis cracks (transmitted light without an analyzer); в – dispersed organic matter (C) in pores of gypsum matrix (Gp).

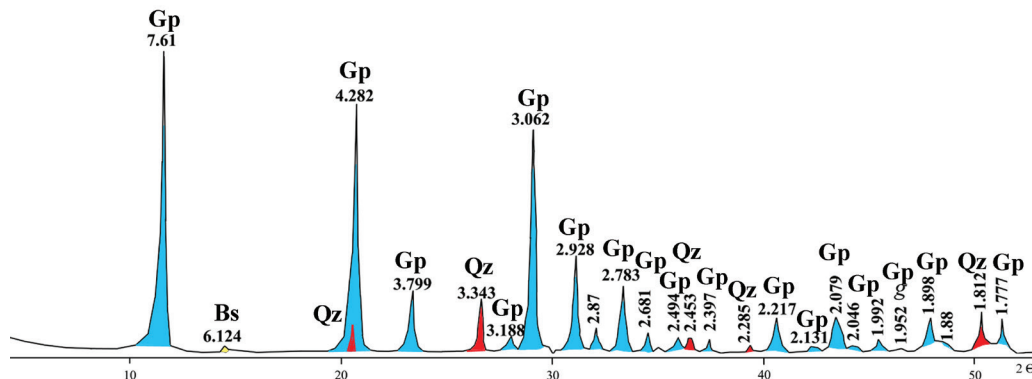


Рис. 6. Дифрактограмма гипсового материала (обр. ГД-153-9). Bs – бассанит.

Fig. 6. X-ray diffraction pattern of gypsum material (sample GD-153-9). Bs – bassanite.

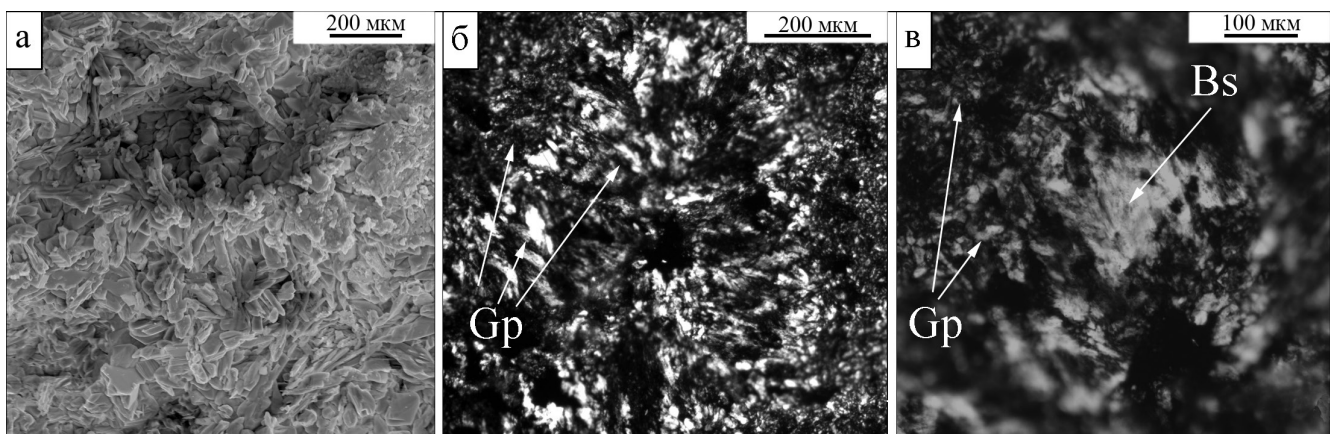


Рис. 7. Морфология новообразованных минералов в гипсовом материале: а – сростки мелких кристаллов гипса; б – призматические и игольчатые агрегаты гипса на стенке полости; в – агрегаты гипса в краевой части поры и лучисто-волокнистые агрегаты бассанита в центре. СЭМ-фото (а), проходящий свет с анализатором (б, в).

Fig. 7. Morphology of newly formed minerals in gypsum material: а – intergrowths of small gypsum crystals; б – prismatic and acicular gypsum aggregates on walls of the cavity; в – gypsum aggregates in the marginal part of the pore and radiant-fibrous bassanite aggregates in the center. SEM photo (а), transmitted light with analyzer (б, в).



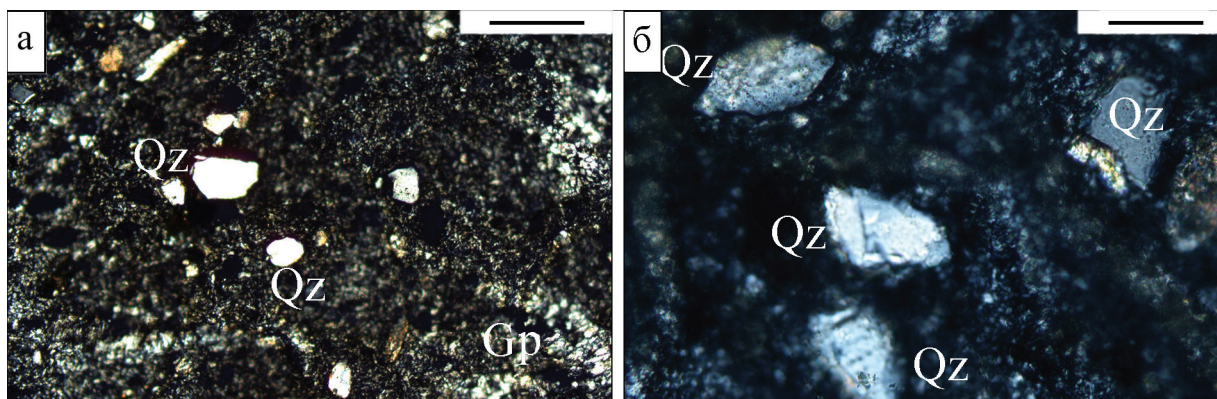


Рис. 8. Скопления кварцевых зерен в гипсовом агрегате: а – кварц в глинисто-гипсовом цементе; б – деформированные кварцевые зерна с флюидными включениями и чешуйками слюд.

Проходящий свет с анализатором. Масштаб 200 мкм.

Fig. 8. Quartz grains in gypsum aggregate: а – quartz in clay-gypsum matrix; б – deformed quartz grains with fluid inclusions and mica flakes.

Transmitted light with analyzer. Scale bar is 200  $\mu\text{m}$ .

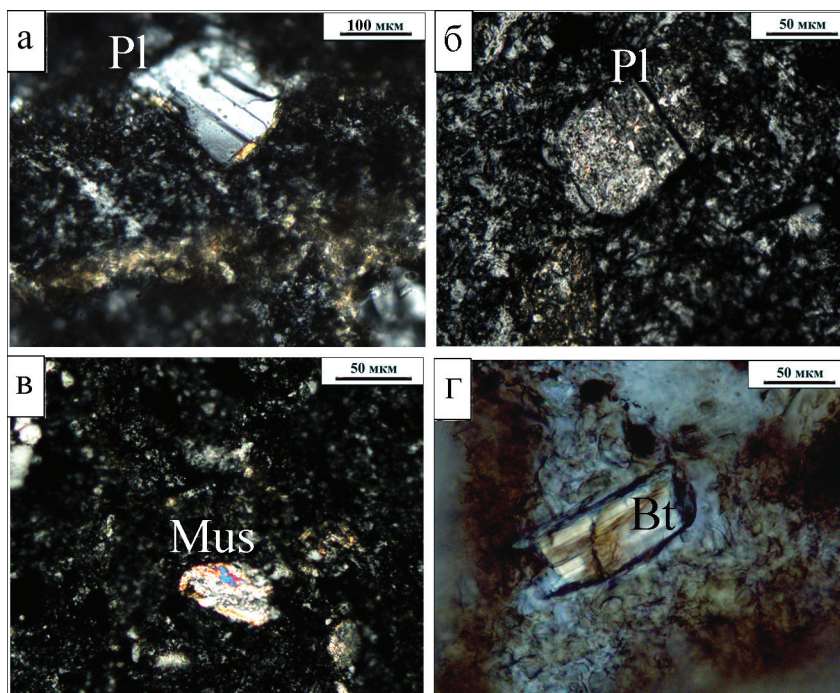


Рис. 9. Обломки минералов в глинисто-гипсовом цементе: а – деформированное зерно плагиоклаза с полисинтетическими двойниками; б – зерно серицитизированного плагиоклаза; в – чешуйки мусковита (Mus); г – пластинка биотита.

Проходящий свет с анализатором.

Fig. 9. Fragments of minerals in clay-gypsum matrix: а – deformed plagioclase grain with polysynthetic twins; б – grain of sericitized plagioclase; в – muscovite flakes (Mus); г – biotite plate.

Transmitted light with analyzer.

Опал выполняет пустоты округлой и овальной формы размером от 0.01 до 0.10 мм. Определен кристаллооптическим методом по характерным признакам: относительному показателю преломления (полоска Бекке идет на бальзам), рельефной поверхности и отчетливой изотропии.

Плагиоклаз образует редкие обломки таблитчатых зерен с отчетливыми полисинтетическими двойниками (рис. 9а). Состав минерала соответствует олигоклазу ( $\text{An}_{24}$ ). Общее количество плагиоклаза не превышает 0.5–1 %. Отдельные зерна серицитизированы и местами сильно деформированы (рис. 9б).

Мусковит представлен пластинчатыми и чешуйчатыми, часто деформированными агрегатами размером до 0.15 мм (рис. 9в). Биотит встречается значительно реже (0.3 %) и образует чешуйчатые и пластинчатые зерна (рис. 9г). Минерал частью хлоритизирован и расщеплен. Иногда в нем фиксируется тонкая вкрапленность рудного минерала, а также редкие иголки рутила.

Эпидот образует единичные зерна округлой формы размером 0.08 и 0.10 мм. Он отличается от цоизита высокой интерференционной окраской. Цоизит представлен одним трещиноватым зерном размером 0.06 мм, обладающим в скрещенных николях пятнистой желтовато-синей аномальной интерференционной окраской.

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Судя по внешнему виду слепка, его минеральному составу и характерным текстурно-структурным особенностям, представленный образец не является природным образованием. Он имеет техногенное происхождение и был получен из обожженного гипсового сырья, размолотого в порошок. Материал является древнейшей строительной вяжущей смесью, которая затвердевает после смешивания с водой. Основой смеси является гипс. Наряду с ним наблюдаются бассанит, кварц, полевой шпат, слюдястые и глинистые компоненты. Этот материал близок к низкосортным строительным смесям, которые в настоящее время используются для побелки и штукатурки стен (Косенко, 2015).

Технология изготовления гипсовых вяжущих обмазок относительно проста. Она основана на тепловой обработке гипса при различных температурах (рис. 10). Сырьем для получения материала служит природный гипсовый камень.

Согласно экспериментальным данным (Косенко, 2015), в гипсе при нагревании выше 65 °С начинаются процессы дегидратации. В температурном интервале 110–120 °С сырье превращается в бассанит. Последний в зависимости от типа обжига может иметь две модификации:  $\alpha$  и  $\beta$ . Если обезвоживание осуществляется в паровлажной среде или в водном растворе (закрытый обжиг), то образуются хорошо оформленные плотные призматические или игольчатые кристаллы  $\alpha$ -полугидрата. При прогреве на открытом воздухе получают волокнистые шероховато-пористые агрегаты или мелкие плохо выраженные кристаллы  $\beta$ -разновидности.

При этом общая пористость материала резко увеличивается и может достигать 30 %.

С повышением температуры до 170–210 °С  $\beta$ -полугидраты преобразуются в нестойкий обезвоженный полугидрат. При дальнейшем нагреве (220–360 °С) он переходит в  $\beta$ -растворимый ангидрит, который с повышением температуры превращается в нерастворимый, так называемый, «намертво обожженный» ангидрит.

Для получения вяжущего раствора к полученной сухой смеси добавляется небольшое количество воды. Это вызывает обратный эффект – ангидрид начинает активно поглощать влагу, и через бассанит преобразуется в гипс. Данный процесс связан с образованием пересыщенного раствора, в результате чего двуводный сульфид Са сначала выделяется в коллоидно-дисперсное состояние, а затем кристаллизуется с образованием агрегатного сростка, что ведет к быстрой цементации материала (Справочник..., 1966). Стадия преобразования пластичного теста в камнеподобную массу занимает 1–2 ч.

По нашему мнению, морфология и размеры новообразованных гипса и  $\beta$ -бассанита в шлифах соответствуют условиям их кристаллизации по схеме, предложенной Н.Ф. Косенко. Это доказывает наличие стадии прокаливания материала в технологии производства смеси и указывает на то, что обжиг сырья происходил в открытой, т. е. сообщающейся с атмосферой, системе. Отсутствие микровключений галита на поверхности образца подтверждает данное предположение и, кроме того, свидетельствует, что при нагреве не были использованы солевые растворы. Наличие не полностью дегидратированных и неаморфизованных глинистых минералов в гипсовой смеси говорит о температуре обжига менее 550 °С, а полное отсутствие следов ангидрида в веществе позволяет снизить нижний предел до 320–360 °С. Не исключено, что часть материала была обожжена не до конца. Отличительным признаком этого является комкование вяжущего материала, связанное с быстрым загустением и схватыванием гипсовой массы (Косенко, 2015).

Гипс широко применялся в Гонур-депе и являлся одним из наиболее распространенных видов сырья. Материалы на его основе использовались для штукатурки и побелки стен ритуальных зданий (Оразов, 2016), культовых сооружений алтарей и хранилищ золы (Сарианиди, 2010), обмазки крупных керамических изделий (Юминов, Манбетова, 2016).

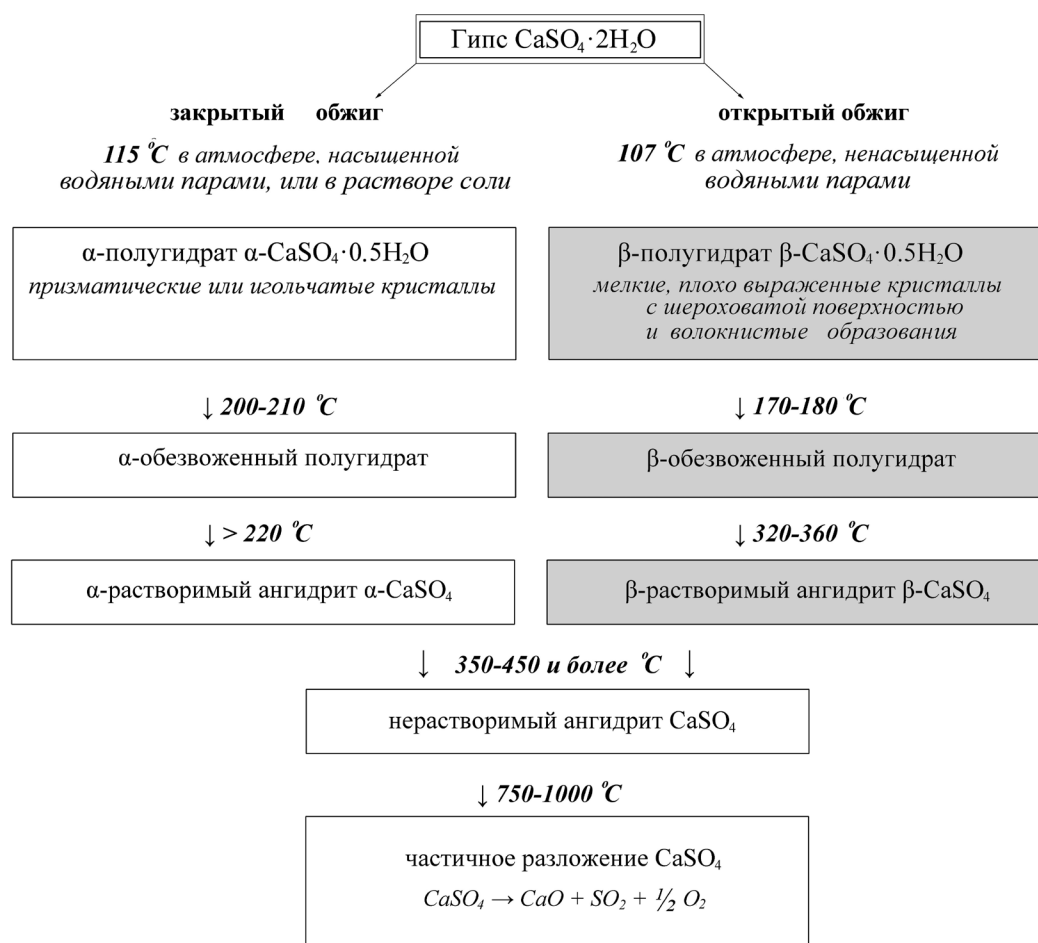


Рис. 10. Схема преобразования гипса в процессе термообработки, по (Косенко, 2015) с добавлениями). Серым цветом выделены температурные режимы, используемые в центре Гонур-депе.

Fig. 10 Scheme of transformation of gypsum during thermal treatment, modified after (Kosenko, 2015). The temperature regimes used at the Gonur Depe site are shown in gray.

Подобный материал отмечен на территории Южного Гонура в ямах, стены которых были армированы ивовой лозой и обмазаны гипсовой массой (Сатаева, 2016). Гипс-содержащие связующие вещества использовались для крепления мозаичных вставок на деревянных стенках ларца-дарохранильницы (Вересоцкая, 2016). Тессеры знаменитых мозаичных панно скреплялись мастикой черного цвета. В ее состав входили черный углеродистый пигмент, кварц, гипс, термически обработанные природные смолы, реже смесь извести и кварца с добавлением гипса (Ковалева, 2012; Dubova et al., 2019).

Строительный гипс, полученный путем обжига, известен человечеству с древнейших времен. В VI–III тысячелетиях до н.э., он использовался в глино-гипсовых, гипсо-глиняно-известковых и гипсо-известковых кладочных и штукатурных сме-

сях (Рахимов, 2021). Данный материал был обнаружен в знаменитых памятниках древнего Египта: пирамиде Хеопса, гробнице его матери, Большом Сфинксе (Gourdin, Kingery, 1975; Lucas, Harris, 2012). В древнеиндийских городах Мохенджо-Даро и Хараппа (середина III тыс. до н.э.) стены отдельных зданий были покрыты светло-серым гипсовым раствором с добавками песка, глины и известковой муки (Strahan, 1991; Mishmastnehi et al., 2023). Со II тысячелетия до н.э. в Индии кладочные и штукатурные растворы на основе высокообжигового гипса ( $800\text{--}950^\circ\text{C}$ ), отличающиеся повышенной водостойкостью, использовались при строительстве гидротехнических сооружений. В более поздние времена в Передней и Средней Азии на основе кладочного и штукатурного раствора из гипса были построены мавзолей султана Санджара (Старый



Мерв), мост через реку Мургаб, бани в г. Бухаре, а также другие монументальные и гражданские объекты (Рахимов, 2021).

На территории современного Туркменистана имеется большое количество месторождений и рудопоявлений гипсового камня: Большое Балханское, Копетдагское, Гаурдак-Кугитангское, Бадхызское, Карабильское и др. Все они находятся в пределах 100–300 км от центра Гонур-депе. Однако, по нашему мнению, в качестве сырьевого источника в древности использовался не чистый гипсовый камень, а местный материал, так называемая гажа. Данное сырье представлено землистыми породами, состоящими из смеси мелкозернистого гипса, и значительного количества тонкодисперсного песчано-глинистого материала. Содержание  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  в них может изменяться от 30 до 70 %. Многочисленные выходы гажи на дневную поверхность известны среди делювиально-пролювиальных отложений в бассейнах рек Теджент и Мургаб (Геология..., 1957). Часть объектов разрабатывается местным населением кустарным способом и в настоящее время.

Проявления гажи имеют незначительные размеры и мощности. Тем не менее, благодаря их большому количеству, относительно небольшому удалению от археологического памятника и сравнительно простой технологии добычи, можно предположить, что и в древности «мургабская гажа» представляла практический интерес для производства вяжущего материала. Вопрос установления конкретного источника гипса, используемого в Гонуре, остается открытым. Как правило, минеральный состав гажи непостоянен и варьирует даже в пределах одного проявления.

Найденный обломок гипсового слепка доказывает существование в центре Гонур-депе технологии обжига сырья. Дальнейшей задачей археологических работ станет поиск специальных площадок, на которых происходил обжиг. На этих площадках, помимо развалов печей и прокаленного грунта, должны находиться отвалы угольно-золистого материала, а также склады сырья, фиксирующихся по скоплениям гипсовых куч. Также необходимо сравнение изотопного состава гипсов, обнаруженных в центре Гонур-депе с образцами сырья из местных источников. Первые изотопные данные показали небольшую вариацию состава гипсового изделия ( $\delta^{34}\text{S}$  от +8.35 до +10.72 ‰), однако небольшая выборка пока не позволяет делать уверенные выводы о разработки гипсового камня в древности.

## ЛИТЕРАТУРА

Вересоцкая Г.Э. (2016) Исследование и реставрация мозаичного декора стенки ларца-дарохранительницы конца III тыс. до н.э. из царской гробницы Гонур-депе (Туркменистан). *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 6. М., Старый сад, 315–323.

Геология СССР. Туркменская ССР. Полезные ископаемые (1957) / Под ред. Н.П. Луппов. М., Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр. Т. XXII, Ч. II, 623 с.

Голлербах М.М. (1951) Водоросли, их строение, жизнь и значение. М., Наука. 175 с.

Зайцева Г.И., Дубова Н.А., Семенцов А.А., Реймар П., Мэллори Дж., Юнгнер Х. (2008) Радиоуглеродная хронология памятника Гонур Деде. *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 2. М., Старый сад, 166–179.

Ковалева Н.А. (2012) Предварительные исследования и консервация двух фрагментов «ковровых» мозаик из Гонура. *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 4. М., Старый сад, 176–184.

Кожин П.М. (2008) Керамика Гонур Деде. *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 2. М., Старый сад, 180–195.

Косенко Н.Ф. (2015) Химическая технология вяжущих материалов и изделий на их основе. Воздушные вяжущие вещества. Учебное пособие. Иваново, ИГХТУ, 219 с.

Оразов А. (2016) Эпоха бронзы в Маргиане: строительные материалы и конструкции. *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 6. М., Старый сад, 224–231.

Папахристу О.А. (2016) Опыт сопоставления: мастерская металлостроителей на городище Гонур-депе (Туркменистан) и квартал металлостроителей на городище Шахдад (Иран). *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 6. М., Старый сад, 232–256.

Рахимов Р.З. (2021) Гипс в строительстве с древних веков до современности. *Архитектура и строительство*, 4, 120–124. <https://doi.org/10.22337/2077-9038-2021-4-120-124>

Сарианиди В.И. (1974) Бактрия в эпоху бронзы. *Советская археология*, 4, 49–71.

Сарианиди В.И. (2010) Задолго до Заратуштры (археологические доказательства протозороастризма в Бактрии и Маргиане). М., Старый сад, 200 с.

Сатаев Р.М., Сатаева Л.В. (2012) Крупный рогатый скот в хозяйстве древней Маргианы. *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 4. М., Старый сад, 154–158.

Сатаева Л.В. (2016) Результаты исследований остатков древесины из раскопок Гонур-депе. *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 6. М., Старый сад, 307–314.

Сатаева Л.В., Сатаев Р.М. (2012) Археоботанические исследования на Гонур Депе. *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 4. М., Старый сад, 159–162.

Справочник химика (1966) / Под ред. Б.П. Никольского. М., Госхимиздат, т. 3, 1070 с.

Юминов А.М. (2012) Горные породы, употреблявшиеся для изготовления орудий и изделий из камня, обнаруженные при археологических раскопках административно-культурного комплекса Гонур Депе (южная часть дворца и теменос). *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 4. М., Старый сад, 163–166.

Юминов А.М., Манбетова Г.Р. (2016) Минеральный состав и геохимические особенности внутренней обмазки хумов для производства Сомы-Хаомы в административно-культурном центре Гонур Депе (юго-восточные Каракумы). *Геоархеология и археологическая минералогия-2016*. Миасс, ИМин УрО РАН, 89–93.

Avilova L. (2008) Regional models of metal production in Western Asia in the Chalcolithic, Early and Middle Bronze ages. *Trabajos de Prehistoria*, 65 (1), 73–91.

Gourdin W.H., Kingery W.D. (1975). The beginnings of pyrotechnology: Neolithic and Egyptian lime plaster. *Journal of Field Archaeology*, 2 (1–2), 133–150.

Dubova N.A., Kovaleva N., Veresotskaya G.E., Yuminov A.M. (2019) Mosaics from the Bronze age necropolis in Gonur Depe, Turkmenistan. *Journal of Mosaic Research*, 12, 17–35. <https://doi.org/10.26658/jmr.614841>

Kraus S. (2016) Metallurgical investigation at Gonur Depe, Turkmenistan. *Труды Маргианской археологической экспедиции*, т. 6. М., Старый сад, 257–264.

Lucas A., Harris J. (2012) Ancient Egyptian materials and industries. London, Courier Corporation, 554 p.

Lyonne B. (2005) Another possible interpretation of the Bactro-Margiana culture (BMAC) of Central Asia: the tin trade. In: *South Asian Archaeology*, 1, 191–200.

Mishmastnehi M., Van Driessche A.S., Smales G.J., Moya A., Stawski T.M. (2023) Advanced materials engineering in historical gypsum plaster formulations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120 (7), 31–44. <https://doi.org/10.1073/pnas.2208836120>

Strahan D.K. (1991) Special studies: naturally deposited versus intentionally applied gypsum on archaeological materials from Harappa, Pakistan. *Journal of Field Archaeology*, 18, 527–530.

Steinkeller P. (2014) Ancient Iran new perspectives from archaeology and cuneiform studies. *Proceedings of the International Colloquium held at the Center for Eurasian Cultural Studies*. Kyoto, Kyoto University, 127–150.

Yuminov A.M., Blinov I.A., Ankusheva N.N. (2021) The mineral composition of ground material from the stone pestles of the Gonur-Depe administrative and religious Center (South-Eastern Karakum). *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy, Springer Proceedings in Earth, and Environmental Sciences*. Springer, Cham, 75–82.

## REFERENCES

Avilova L. (2008) Regional models of metal production in Western Asia in the Chalcolithic, Early and Middle Bronze ages. *Trabajos de Prehistoria*, 65 (1), 73–91.

Dubova N.A., Kovaleva N., Veresotskaya G.E., Yuminov A.M. (2019) Mosaics from the Bronze Age necropolis in Gonur Depe, Turkmenistan. *Journal of Mosaic Research*, 12, 17–35. <https://doi.org/10.26658/jmr.614841>

Gollerbah M.M. (1951) *Algae, their structure, life and meaning*. Moscow, Nauka, 175 p. (in Russian)

Gourdin W.H., Kingery W.D. (1975). The beginnings of pyrotechnology: Neolithic and Egyptian lime plaster. *Journal of Field Archaeology*, 2 (1–2), 133–150.

*Handbook of a chemist* (1966) Ed. by B.P. Nikolsky. Moscow, Goskhimizdat, 1070 p. (in Russian)

Kosenko N.F. (2015) *Chemical technology of binding materials and products based on them*. Air binders. Ivanovo: IGKhTU, 219 p. (in Russian)

Kovaleva N.A. (2012) Preliminary research and conservation of two fragments of “carpet” mosaics of Gonur. *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 4 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 4)*. Moscow, Stary sad, 176–184. (in Russian)

Kozhin P.M. (2008) Gonur Depe ceramics. *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 2 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 2)*. Moscow, Stary sad, 180–195. (in Russian)

Kraus S. (2016) Metallurgical studies at Gonur Depe, Turkmenistan. *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 6 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 6)*. Moscow: Stary sad, 257–264.

Lucas A., Harris J. (2012) *Ancient Egyptian materials and industries*. London: Courier Corporation, 554 p.

Lyonne B. (2005) Another possible interpretation of the Bactro-Margiana culture (BMAC) of Central Asia: the tin trade. In: *South Asian Archaeology*, 1, 191–200.

Mishmastnehi M., Van Driessche A.S., Smales G.J., Moya A., Stawski T.M. (2023) Advanced materials engineering in historical gypsum plaster formulations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120 (7), 31–44. <https://doi.org/10.1073/pnas.2208836120>

Orazov A. (2016) The Bronze age in Margiana: building materials and structures. *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 6 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 6)*. Moscow, Stary sad, 224–231. (in Russian)

Papachristou O.A. (2016) Experience of the comparison: metalworkers’ workshop at Gonur Depe settlement (Turkmenistan) and the metalworkers’ quarter at Shahdad (Iran). *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 6 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 6)*. Moscow, Stary sad, 232–256. (in Russian)

- Rakhimov R.Z. (2021) Gypsum from ancient times to the present. *Arkhitektura i stroitelstvo (Architecture and Construction)*, 4, 120–124. (in Russian)
- Sarianidi V.I. (1974) Bactria in the Bronze Age. *Sovetskaya arheologiya (Soviet Archeology)*, 4, 49–71 (in Russian)
- Sarianidi V.I. (2010) *Long before Zarathustra (archaeological evidence of Protozoastrianism in Bactria and Margiana)*. Moscow, Stary sad, 200 p. (in Russian)
- Sataev R.M., Sataeva L.V. (2012) Cattle in the household of ancient Margiana. *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 4 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 4)*. Moscow, Stary sad, 154–158. (in Russian)
- Sataeva L.V. (2016) Results of studies of wood remains from the Gonur-depe excavations. *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 6 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 6)*. Moscow, Stary sad, 307–314. (in Russian)
- Sataeva L.V., Sataev R.M. (2012) Archeobotanical study at Gonur Depe. *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 4 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 4)*. Moscow: Stary sad, 159–162. (in Russian)
- Steinkeller P. (2014) Ancient Iran new perspectives from archaeology and cuneiform studies. *Proceedings of the International Colloquium held at the Center for Eurasian Cultural Studies*. Kyoto, Kyoto University, 127–150.
- Strahan D.K. (1991) Special studies: naturally deposited versus intentionally applied gypsum on archaeological materials from Harappa, Pakistan. *Journal of Field Archaeology*, 18, 527–530.
- Veresotskaya G.E. (2016) Study and restoration of mosaic decoration of a casket-tabernacle wall of the end of the III millennium BC from a royal tomb of Gonur-depe (Turkmenistan). *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 6 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 6)*. Moscow, Stary sad, 315–323. (in Russian)
- Yuminov A.M. (2012) Rocks, which were used for tools making and stone products, found during archaeological excavations of the Gonur Depe administrative-religious complex (southern part of the palace and temenos). *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 4 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 4)*. Moscow, Stary sad, 163–166. (in Russian)
- Yuminov A.M., Manbetova G.R. (2016) Mineral composition and geochemical features of the internal coating of hums for the production of soma-haoma of the Gonur Depe administrative-religious complex (Southeast Karakum). *Geoarkheologiya i arheologicheskaya mineralogiya (Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy-2016)*. Miass, IMin UrO RAN, 89–93. (in Russian)
- Yuminov A.M., Blinov I.A., Ankusheva N.N. (2021) The mineral composition of ground material from the stone pestles of the Gonur-Depe administrative and religious Center (South-Eastern Karakum). *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy, Springer Proceedings in Earth, and Environmental Sciences*. Springer, Cham, 75–82.
- Zaytseva H.I., Dubova N.A., Sementsov A.A., Reimeer P., Mallory J., Junger H. (2008). Radiocarbon chronology of the Gonur Depe site. *Trudy Margianskoy arheologicheskoy ekspeditsii, t. 2 (Transactions of Margiana Archaeological Expedition, vol. 2)*. Moscow, Stary sad, 166–179. (in Russian)

---

### Информация об авторах

Кабанова Лариса Яковлевна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, [kablar@mineraly.ru](mailto:kablar@mineraly.ru).

Юминов Анатолий Михайлович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, [umin@mineralogy.ru](mailto:umin@mineralogy.ru).

Блинов Иван Александрович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, [ivan\\_a\\_blinov@mail.ru](mailto:ivan_a_blinov@mail.ru).

### Information about the authors

Larisa Ya. Kabanova – Candidate of Geological–Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences, [kablar@mineraly.ru](mailto:kablar@mineraly.ru).

Anatoly M. Yuminov – Candidate of Geological–Mineralogical Sciences, Senior Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences, [umin@mineralogy.ru](mailto:umin@mineralogy.ru).

Ivan A. Blinov – Candidate of Geological–Mineralogical Sciences, Scientific Researcher, South Urals Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology, Urals Branch, Russian Academy of Sciences, [ivan\\_a\\_blinov@mail.ru](mailto:ivan_a_blinov@mail.ru).