

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЧЕРНОЛАКОВЫХ МИНИАТЮРНЫХ СОСУДОВ ИЗ НЕКРОПОЛЯ ВОЛНА 1 НА АЗИАТСКОМ БОСПОРЕ

Татьяна Валерьевна Егорова

*Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова; Институт археологии
Российской академии наук, Москва, Россия
tvegorova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8479-0518>*

Вероника Сергеевна Смирнова

*Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия; Институт археологии
Российской академии наук, Москва, Россия
veronicasm@jinr.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7652-1863>*

Евгений Янович Зубавичус

*Институт археологии Российской академии наук, Москва, Россия
teremion@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3323-6602>*

Булат Айратович Бакиров

*Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия; Институт археологии
Российской академии наук, Москва, Россия
bulatbakirov4795@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8526-7091>*

Куаныш Мейыргазыұлы Назаров

*Институт ядерной физики, Агентство Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы,
Казахстан
k.nazarov@inp.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4637-2486>*

Сергей Евгеньевич Кичанов

*Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия
ekich@nf.jinr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2324-3051>*

Ирина Анатольевна Сапрыкина

*Институт археологии Российской академии наук, Москва, Россия
dolmen200@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0059-0170>*

Аннотация. В статье приводятся данные аналитических исследований керамического теста и лаковых покрытий восьми миниатюрных сосудов из некрополя Волна 1, расположенного на Таманском полуострове: пиксиды, калафа, кружки, двух миниатюрных мисок варианта *Early and heavy* второй – третьей четвертей V в. до н.э., мисок с выпукло-вогнутым профилем последней трети V в. до н.э., а также солонки рубежа первой – второй четверти IV в. до н.э. Анализ выполнялся методами рентгеновской томографии, дифракции, рамановской спектроскопии и СЭМ-ЭДС. При том, что археометрия играет всё более заметную роль в изучении археологических материалов, комплексные исследования керамической коллекции одного из наиболее полно раскопанных на данный момент боспорских некрополей проводятся впервые. В результате были получены дополнительные данные о составе глин, покрытий, температуре и продолжительности некоторых фаз обжига. Интересными итогами стало определение одной из причин плохой сохранности лакового покрытия, заключавшегося в низкой степени измельчения глиняной суспензии на стадии подготовки, а также подтверждение использования в его составе поташа, подвергавшееся сомнению для аттических глин.

Ключевые слова: Азиатский Боспор, некрополь Волна 1, чернолаковая керамика, миниатюрные сосуды, рентгеновская томография, СЭМ-ЭДС, рамановская спектроскопия, рентгеновская дифракция

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 23-18-00196 «Комплексные исследования нового городского некрополя архаического и классического времени Волна 1 на территории Азиатского Боспора».

FIRST RESULTS OF THE ANALYTICAL RESEARCH OF FINE BLACK-SLIP POTTERY FROM THE CEMETERY OF VOLNA 1 IN THE ASIAN BOSPOROS

Tatyana V. Egorova

M. V. Lomonosov Moscow State University; Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
tvegorova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8479-0518>

Veronika S. Smirnova

Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia; Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
veronicasm@jinr.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7652-1863>

Evgeniy Ya. Zubavichus

Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
teremion@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-3323-6602>

Bulat A. Bakirov

Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia; Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
bulatbakirov4795@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8526-7091>

Kuanys M. Nazarov

Institute of Nuclear Physics, Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan
k.nazarov@inp.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4637-2486>

Sergey E. Kichanov

Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia
ekich@nf.jinr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2324-3051>

Irina A. Saprykina

Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
dolmen200@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0059-0170>

Abstract. The article presents data from analytical studies of ceramic body and slip coatings of eight fine vessels from the cemetery of Volna 1 located on the Taman Peninsula: a pyxis, a kalathos, a cup, two fine bowls of the *Early and Heavy* type from the second and third quarters of the fifth century BC, and bowls with a convex-concave profile from the last third of the fifth century BC, as well as a salt cellar from the turn of the first and second quarter of the fourth century BC. The analysis was performed with X-ray tomography, diffraction, Raman spectroscopy, and SEM-EDS. While archaeometry is playing an increasingly prominent role in the study of archaeological materials, so far this is the first comprehensive study of the ceramic collection from one of the most comprehensively excavated Bosporan cemeteries. In result, additional data was obtained on the composition of the clays, glazed coatings, and the temperature and duration of certain firing phases. Interesting results were the identification of one of the reasons for the poor preservation of the black-slip coating, namely, the low degree of grinding of the clay suspension during the preparation stage, as well as confirmation of the use of potash in its composition, which had been questioned for Attic clays.

Keywords: Asian Bosporos, cemetery of Volna 1, black-glazed ware, fine vessels, X-ray tomography, SEM-EDS, Raman spectroscopy, X-ray diffraction

Acknowledgements: This study was funded by the Russian Science Foundation, project no. 23-18-00196 *Integrated studies of the new urban necropolis of archaic and classical time Volna 1 in the Asian Bosporos.*

Введение. Богатая керамическая коллекция, полученная в ходе раскопок некрополя Волна 1 VI–III вв. до н.э. (Таманский полуостров) [1; 2; 3], содержит более 300 экземпляров миниатюрных сосудов (мисок, солонок, скифосов, блюд, лекифов, амфорисков и пр.), небольшие размеры которых были обусловлены как изначальным функциональным назначением некоторых форм, так и особенностями их использования в погребальной практике, в том числе в качестве вотивов или копий полноразмерных вещей для практического применения, как в случае с миниатюрными глиняными мортарами [4].

Миниатюрные сосуды редко подвергаются отдельным специальным исследованиям глины и покрытий, хотя такие работы тоже известны (например, о металлических покрытиях

глиняных солонок [5; 6, с. 163–166] и др.). Основное же внимание исследователей чаще обращено на античную «парадную» столовую посуду (расписную и чернолаковую), позволяющую изучать технологические особенности ее изготовления, типы формовочных масс, рецептуры покрытий, с определенной долей уверенности определять центры производства и т.п. (подробнее: [7]). Проводимые в последнее десятилетие аналитические исследования, в частности, чернолаковой керамики, комбинация новейших высокочувствительных аналитических методов исследования позволяют получать новую информацию о минералогическом и химическом составе формовочной массы, технологических процессах ее подготовки, детализированные данные о составе и морфологии лакового слоя сосудов и условиях его формирования [8; 9; 10; 11; и др.]. Основной акцент аналитического изучения античной керамики с НАА и РФА смещен в сторону применения таких методов, как сканирующая электронная микроскопия в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (СЭМ-ЭДС), рамановская спектроскопия, дифракция, ИК-спектроскопия с преобразованием Фурье, томография [12; 13; 14; и др.].

Эти методы были применены при изучении небольшой выборки миниатюрных сосудов из керамической коллекции некрополя Волна 1. Основное внимание было сосредоточено на получении первых аналитических данных о составе глин, покрытий, температуре и продолжительности некоторых фаз обжига¹. Задачей исследования является, прежде всего, методическая отработка аналитических процедур и получение необходимых данных для возможных дальнейших сопоставлений с известными рецептурами формовочных масс и покрытий античной керамики.

Выборка состоит из восьми миниатюрных сосудов редких (калаф, кружка) или, напротив, распространенных (пиксида, солонки, миски) форм из семи погребений: №№ 235, 315, 362, 376, 505, 496, 563, датированных, за единственным исключением (солонка из погребения № 315 второй четверти IV в. до н.э.), в пределах второй и третьей четвертей V в. до н.э. Все они отличаются близкими визуальными характеристиками глиняного теста (рис. 1): бежевого или светло-розового (Munsell: 7.5 YR 6/4, 7/6 и 5 YR 7/4), с плотной структурой, без видимых включений, или в одном случае (№ 563) с редкими мелкими блестящими (слюдой?), позволяющего, вкуче с особенностями форм, изначально с определенной долей вероятности, предположить их аттическое производство, хотя подобная цветовая гамма встречается и у изделий из коринфских мастерских синхронного времени [15, с. 145–147], поэтому это предположение требует дополнительной проверки. Качество и степень сохранности лакового покрытия каждого изделия разнятся.

Анализ сосудов из выборки выполнялся методом рентгеновской томографии для анализа пространственного расположения, распределения размеров и форм внутренних пор и визуального определения доли органических включений в объеме сосудов [16]; пробы, отобранные с части сосудов, были исследованы методами рамановской спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции для получения данных о минералогическом и химическом составе формовочной массы и «лакового» слоя.

Характеристика анализируемой выборки. В число отобранных образцов вошли пиксида, четыре миниатюрные миски двух типов, солонка, миниатюрный калаф и кружка.

Пиксиду из погребения 235 [17, с. 226–227] можно условно отнести к типу D в соответствии с классификациями классической и эллинистической аттической чернолаковой керамики [18, с. 177–178; 19, с. 191]². В целом, для сосудов этого типа, использовавшихся начиная с V в. до н.э. на протяжении продолжительного времени (вплоть до римской эпохи) в краснофигурном, чернолаковом, красноглиняном и других исполнениях³ в качестве контейнеров для косметических средств или украшений, характерно цилиндрическое тулово с выпуклыми или вогнутыми стенками, плоское дно и закраина под крышку. Сама крышка имеет углу-

¹ Подробнее о трехэтапном обжиге античной чернолаковой и расписной керамики, истории его выявления, изучения и реконструкции процесса: [7, р. 95, 96].

² Размеры: чаша: D (венчика)–6,0 см, D (дна)–6,4 см, H–3,8 см; крышка: D–6,5 см, толщина макс.–1,0 см.

³ Помимо керамических, аналогичные по форме и назначению изделия делали из металла, дерева, стекла или даже фаянса [19, р. 191].

бление в центральной части соответствующего диаметра. У найденного в некрополе Волна 1 экземпляра есть одно существенное отличие – плоский венчик без закраины, к которому прилагается крышка не с углублением в центре, а с утолщением подходящей к нему формы и размера для более плотного прилегания (рис. 2). Вместе с тем, такой уплощенный край (в нашем случае он выглядит дополнительно сточенным от регулярного контакта с крышкой), вкупе с вогнутыми стенками и плоским дном, типичен для одного из типов солонок [18, р. 301, pl. 34, fig. 9,927–929], довольно часто встречавшихся в Аттике и за ее пределами, в том числе в погребальных комплексах (например: [20, S. 53; 21, S. 125, Taf. 40]). Наличие у некоторых подобных солонок ободка под венчиком – своего рода имитации упора под крышку, позволило Б. Спарксу и Л. Талькотт предположить прямую хронологическую и функциональную связь между этими формами [18, р. 137]. Ближайшая аналогия форме тулова пиксиды из погребения 235 представлена именно среди солонок, датирующихся концом второй четверти V в. до н.э. [20, S. 53, 139, Abb. 20,216/2], что не противоречит контексту находки: из того же погребения происходят три миниатюрные миски типа *Early and heavy* с массивным поддоном (прямые аналогии в аттических материалах 475–450 гг. до н.э.: [18, р. 134, 297, pl. 33,856,858]) и миниатюрное блюдо на ножке, имеющее многочисленные параллели в слоях и комплексах 70-х гг. V в. до н.э. (подробнее: [18, р. 305, pl. 35,981; 22, с. 88, рис. 16,158]). Пиксида покрыта тонким, относительно ровным слоем чуть блестящего черного лака. В цвете глины оставлены внутренняя поверхность крышки, а также край и дно сосуда, окрашенные красной краской.

Две из четырех миниатюрных мисок (из погребений 362.17 и 505) практически идентичны по форме и размерам⁴ (рис. 2) и относятся к варианту *Early and heavy* по Б. Спарксу и Л. Талькотт, довольно широко распространенному на античных памятниках в слоях, преимущественно, второй и третьей четвертей V в. до н.э. [18, р. 134; 23, р. 22, 110]. Венчик обоех мисок загнут внутрь, край заглажен; низкий кольцевой поддон продолжает направление стенок, сужаясь к подошве, что характерно для сосудов третьей четверти столетия (типологически близки: [18, р. 267, pl. 49, fig. 5,457–461]). При сходных визуальных характеристиках глины, заметна существенная разница в качестве покрытия. Если на миске № 362.17 лак черный, чуть блестящий, нанесен тонким ровным слоем, то у миски № 505 он имеет красный цвет. При этом степень его стертости (вероятно, результат длительного или интенсивного использования до помещения в могилу) примерно одинакова, со значительным увеличением количества сколов к краю венчика (подробнее: [24, с. 245]).

Еще две однотипные миски (из погребений 362 и 563)⁵ являются миниатюрными вариантами мисок с выпукло-вогнутым профилем (рис. 2). Это довольно массивные (особенно в их верхней трети) сосуды с рельефной внешней поверхностью с утолщением у края и низким кольцевым поддоном относительно большого диаметра. Оба экземпляра отличаются небольшой толщиной стенки поддона. Это обстоятельство позволяет датировать их 30-ми гг. V в. до н.э. [18, р. 131; 25, р. 92, 98, beil. 3; 26, р. 217; 27, с. 105; 28, с. 167, 182, 183; 29, р. 91], что соответствует хронологии сопутствующего инвентаря погребений, из которых они происходят. Миска № 362 покрыта тонким неровным слоем черного, чуть блестящего лака. В тесте миски № 563 можно различить мельчайшие включения слюды, лак черный с бурыми пятнами, матовый.

Солонка⁶ из погребения 315а относится к популярному (особенно в IV в. до н.э.) типу «с вогнутыми стенками» (рис. 2): внешний контур стенки завершается сверху слегка утолщенным отогнутым краем, снизу продолжением стенки является поддон с плоской подошвой; край венчика и поддон симметрично отогнуты наружу. Лаковое покрытие довольно толстое, черного цвета с выраженным металлическим блеском, сильно стерто, особенно по краю. Как по известным аналогиям (например: [18, р. 302, pl. 34,936]), так и по контексту комплекса, в который входят кубковидный скифос с массивными стенками (аналогичен: [18, р. 262, pl. 27, fig. 6,621; 21, S. 150, Abb. 38,299; 30, р. 133–134, 48; 22, с. 34, 35, рис. 6, табл. 11,52]), куб-

⁴ Размеры: D (венчика)–7,0 см, D (поддона)–4,5 см, H–2,5 см.

⁵ Размеры: № 362: D (венчика)–10,0 см, D (поддона)–6,8 см, H–3,5 см; № 563: D (венчика)–8,6 см, D (поддона)–7,0 см, H–2,4 см.

⁶ Размеры: D (венчика)–6,7 см, D (поддона)–6,7 см, H–2,6 см.

ковидный канфар с низким горлом (аналогичен: [18, p. 284, pl. 28,681]), миска с отогнутым наружу краем (типологически близка: [18, p. 293, pl. 32, fig. 8,803]), две миниатюрные миски варианта *Light and later* (типологически близки: [18, p. 298, pl. 33, fig. 9,876]) и аск уплощенного типа (аналогичен: [18, p. 318, pl. 39,1177,1178]), дата сосуда может быть определена в пределах конца первой – начала второй четверти IV в. до н.э.

Миниатюрный калаф⁷ (погребение 376) – довольно редкий тип сосудов, очевидно не использовавшихся в быту, но периодически встречающийся в погребениях (например: [20, S. 181, Abb. 49,ES32]) (рис. 2). Венчик с прямым краем плавно отогнут наружу, массивные подвертикальные стенки в верхней трети имеют горизонтальный выступ-ребро, низкий относительно массивный кольцевой поддон выходит за границы плоского дна. Лак черный с оливковым оттенком, матовый, тонкий неровный слой. Красной краской окрашены бортик и подошва поддона, а также внешняя поверхность дна, декорированная лаковыми точкой и кольцом малого диаметра. Форма довольно статична и по ее особенностям сложно говорить о точной хронологии сосуда. Однако по многочисленному сопутствующему инвентарю, а именно чаше типа *Stemless* со смещенным венчиком (типологически близка: [18, p. 268, fig. 5], 471/470–450 гг. до н.э.), миниатюрным мискам с широким уплощенным краем (аналогичны: [18, p. 134, 296, fig. 9,849; 29, p. 219, pl. 60,1105], 475–450 гг. до н.э.) и с выпукло-вогнутым профилем (аналогичны: [18, p. 294, fig. 8,817; 26, p. 217; 20, с. 105; 28, с. 167, 182, 183; 29, p. 91], 450–400 гг. до н.э.), блюдам на ножках (типологически близки: [18, p. 305, pl. 35,984,985 и 982], ок. 480 г. до н.э. и 460 г. до н.э., соответственно), его можно датировать второй четвертью – серединой V в. до н.э.

Кружки, аналогичные миниатюрному сосуду из погребения 496⁸ (рис. 2), на протяжении всего V в. до н.э. производили в аттических мастерских [18, p. 70; 25, p. 105]. Для анализируемого экземпляра характерны отогнутый наружу венчик с заглаженным краем, низкое широкое горло и объемное каннелированное тулово на плоском дне; двустовальная уплощенная в сечении ручка крепится к краю и плечу. Стык горла и тулова декорирован валиком с имитацией кручения. Лак черный, блестящий, тонким ровным слоем покрывает весь сосуд. Ближайшие аналогии происходят из раскопок афинской агоры, где датируются концом второй четверти V в. до н.э. [18, p. 250, pl. 11,201,202].

Методика аналитического исследования. Аналитические исследования выполнялись на приборной базе Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований и Центра коллективного пользования Института археологии РАН.

Визуализация распределения материала внутри объема керамических сосудов из погребений №№ 235, 315, 362, 376, 505, 496, 563 выполнялась методом рентгеновской томографии с использованием настольной системы компьютерной микротомографии «ПРОДИС. Компакт» (Россия). Полученные в эксперименте рентгеновские изображения корректируются на фоновые шумы детекторной системы и нормализуются на падающий рентгеновский пучок с помощью встроенного программного обеспечения. Для визуализации и анализа получаемых трехмерных данных использовался программный комплекс VGStudio MAX 2.2 фирмы Volume Graphics (Германия).

С сосудов удалось отобрать образцы для дальнейшего аналитического исследования состава покрытия и керамического теста. Для образцов № 235, 315, 362.17, 376, 496, 505, 563 элементный анализ по методу СЭМ-ЭДС выполнялся без пробоподготовки на растровом электронном микроскопе CX-200P Сохем (Южная Корея) с детектором ULTIM MAX 65 (Oxford instruments) при ускоряющем напряжении 20 кВ, в режиме низкого вакуума; и на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA Compact LMN (Чехия) с энергодисперсионным детектором Xplore 15 при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 3 пА в режиме высокого вакуума (10^{-3} Па). Накопление ЭДС спектров длилось до набора 1000000 импульсов.

Образцы № 315, 496, 563, 235 были дополнительно исследованы на поперечных непрозрачных шлифах, подготовленных с использованием автоматического шлифовально-полировального станка. Образцы помещались в эпоксидную смолу так, чтобы пло-

⁷ Размеры: D (венчика)–7,9 см, D (поддона)–5,8 см, Н–4,9 см.

⁸ Размеры: D (венчика)–8,2 см, D (поддона)–5,9 см, Н–8,5 см.

скость слоя покрытия на фрагменте была перпендикулярна поверхности шлифа. На поверхность шлифов было нанесено токопроводящее покрытие (углерод). Элементный анализ выполнялся методом СЭМ-ЭДС на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA Compact LMH (Чехия) с энергодисперсионным детектором Xplore 15 при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 3 нА в режиме высокого вакуума (10^{-3} Па). Измерение элементного состава формовочной массы проводилось в центральной части шлифа на участке площадью 1×1 мм, а элементного состава покрытия – на небольших участках 50×50 мкм.

Эти же образцы были исследованы методом рамановской спектроскопии на оптическом микроскопе ADF U300M, оснащённом анализатором “Инспектр” R532 с лазером 532 нм (Россия). Мощность лазера подбиралась в зависимости от типа образца (обычно 0,8–1,5 мВт). Измерения проводились в спектральном диапазоне $160\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ с разрешением $4\text{--}6\text{ см}^{-1}$. Идентификация спектров проводилась с использованием базы спектров RRUFF и научных публикаций [31].

Анализ фазового состава минеральной составляющей для нескольких образцов (№ 315, 496) методом рентгеновской дифракции был выполнен на многофункциональном рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Н Буревестник (Россия) с вертикальным тета-тета гониометром, рентгеновской трубкой БСВ-29Cu, детектором Mythen 2R 1D. Полученные рентгеновские данные анализировались методом Ритвельда с использованием программного комплекса «Качественный и количественный фазовый анализ по базе COD»⁹.

Обсуждение результатов и дискуссия.

Рентгеновская томография. Из томографических проекций были реконструированы трехмерные модели керамических сосудов, из которых, в свою очередь, были выделены данные по объёмному распределению материалов в образцах, в частности внутреннего порового пространства и включений (рис. 3). Полученные трехмерные модели являются массивом вокселей, каждый из которых характеризует коэффициент ослабления рентгеновского излучения в определенной точке объема объекта. Относительный объем пор несколько отличается от образца к образцу, хотя и не превышает 1% (табл. 1). Минимальное значение пористости присутствует в сосудах № 362 и № 496 и составляет 0,06% и 0,09% соответственно, а максимальная – в миске № 563 (0,62%) и солонке № 315 (0,69%). Также незаметна существенная разница в содержании включений, составляющих 0,01–0,02% от объема образцов, за исключением пиксиды № 235 (0,19%) и калафа № 376 (0,35%), в которых наблюдаются довольно специфические включения. В образцах № 235 и № 376 крупные включения присутствуют в области с наиболее тонкими стенками, что может намекать на намеренное внесение дополнительного материала в качестве технологической присадки для улучшения прочностных свойств в тонкой области (или являться особенностями глины).

С помощью процедуры сегментации трехмерных проекций были получены и проанализированы объемные и морфологические характеристики пор внутри образцов. В первую очередь был рассмотрен параметр эквивалентного диаметра, который соответствует диаметру сферы того же объема в вокселях, что и рассматриваемая пора неправильной формы. Полученные распределения эквивалентных диаметров пор для образцов показаны на рис. 4, представляющем собой скрипичную диаграмму, которая в свою очередь сочетает диаграммы размаха и графики плотности. Получили, что средний и медианный размер пор во всех образцах находится в диапазоне от 0,49 до 0,67 мм. Однако пиксида № 235 и кружка № 496 выбиваются из выборки со средними значениями 0,96 и 0,38 мм соответственно. В большинстве образцов распределение по эквивалентному диаметру имеет асимметричный характер с одним выраженным максимумом. Для пиксиды № 235 и солонки № 315 наблюдается ярко выраженное плечо со вторым пиком на кривой распределения. Также значительный перекося графика плотности распределения вероятности относительно межквартильного диапазона и доверительного интервала обуславливается наличием крупных единичных пор в этой обла-

⁹ Аналитическая обработка дифракционных спектров с расшифровкой данных выполнена к.г.-м.н, зав. лаб. рентгеновских дифрактометров и методов АО «ИЦ «Буревестник» Т. И. Ивановой. Авторы выражают ей свою искреннюю признательность.

сти. Мы предполагаем, что такие крупные пустоты могут быть результатом интенсивного выделения газа из дополнительных примесных компонентов в материале.

Форма пор оценивалась с помощью параметра вытянутости (элонгации). В этом случае объем поры аппроксимируется эллипсоидом, по соотношению полуосей которого определяется степень вытянутости. Если полученное значение параметра приближается к 1, то соответствующая пора считается сферичной, если же значение приближается к 0 – поры максимально вытянутые, приближенные к линии.

Полученные вероятностные распределения параметров вытянутости пор представлены на рис. 5. Видно, что распределение по вытянутости пор имеет довольно сложный характер. Присутствуют мультимодальные распределения как с ярко выраженным одним максимумом, так и с неявными максимумами.

Для систематизации структурных данных, полученных с помощью нейтронной томографии, были построены контурные диаграммы отношения размера пор к параметру вытянутости, и обобщенная контурная диаграмма всех исследованных керамических объектов (рис. 6). Можно заметить, что большинство пор имеют размер в диапазоне примерно 0,4–0,5 мм, при этом значения вытянутости находятся в диапазоне от 0,1 до 0,3 мм, независимо от размера частиц. Также существует область с более крупными порами, размером примерно 3–6 мм в этом же диапазоне параметра вытянутости. Это говорит о наличии небольшого количества крупных нерегулярных пустот в некоторых образцах керамики. Интересно, что пиксида № 235 демонстрирует самое широкое распределение по размеру с максимальным значением ~6,2 мм.

Элементный анализ методом СЭМ-ЭДС выполнен для сосудов № 235, 315, 362.17, 376, 505, 496, 563; точность анализа различается, так как часть образцов исследовалась при низком, часть – при высоком вакууме. Сводные данные по элементному составу представлены в таблицах 2–3: все вариации по содержанию основных элементов (Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Fe) для каждого исследованного образца суммированы и представлены отдельно для покрытия (в таблице – «лак») и для формовочной массы («тесто»). Отметим, что только в некоторых точках анализа зафиксированы такие микроэлементы, как Mn, P, Cl, Cr, Ba – они нами не учитываются; набора таких микроэлементов, как Co, Cu, Zn, Pb, As не зафиксировано. В представленных данных (табл. 2; 3) хорошо прослеживаются различия в % содержании стандартного набора элементов по поверхности покрытия (лак) и без покрытия (тесто).

Среди образцов, изученных при низком вакууме, особо выделяется образец № 376, где отмечается повышенное содержание Ca в формовочной массе (табл. 2); повышенное содержание Ca в тесте дал и образец № 235, изученный в высоком вакууме, также без пробоподготовки (табл. 3). Собственно, кальций указывает на присутствие в керамике большого объема карбоната кальция, легко реагирующего с глинистыми минералами [35]. Но зафиксированное количество кальция в этом образце может и не относиться именно к рецептуре керамического теста: известно, что керамика после выпадения в захоронение активно насыщается кальцитом из почвы, когда он заполняет пустоты и глинистые комки [34].

Детальный анализ формовочной массы четырех образцов (№ 235, 563, 496, 315), выполненный по подготовленным шлифам, показал, что они имеют алевропелитовую структуру, характерную для керамики из отмученной глины. Крупных включений, которые могли бы рассматриваться как антропогенные добавки, не зафиксировано. Небольшие включения, являющиеся естественной составной частью глины, имеют неокатанную, часто удлинённую форму и размеры не более 200–300 мкм. Несмотря на общую схожесть структуры, в шлифах наблюдались различия в размере частиц включений, минеральном составе и строении слоя покрытия. В образцах керамического теста наблюдается присутствие некоторых примесей – отдельных частиц кварца, калиевого полевого шпата, мусковита, альбита, следы анатаза и апатита (табл. 5; рис. 7).

Среди данных, полученных по специально подготовленным шлифам, выделяется пиксида № 235, где фиксируется значительное, по сравнению с иными, содержание оксида кальция в тесте (CaO) (табл. 4). В шлифе наблюдаются обломки кристаллов размером 5–100 мкм, доминирует 20 мкм. Большинство частиц ориентированы случайно, но крупные пластинки слюды часто лежат параллельно поверхности сосуда или под острым углом к ней. Включения

занимают до 40% площади шлифа. Большинство включений составляет кварц, щелочные полевые шпаты, мусковит и неидентифицированная фаза (возможно, продукты разложения минералов группы хлорита) с теоретической формулой $(\text{Mg,Fe})_2(\text{Al,Si})_2\text{O}_6$ (рассчитано по элементному составу). В небольшом количестве присутствуют альбит, гематит и оксид титана (анатаз или рутил). Отмечаются отдельные включения коллофана (апатита).

В тесте миски № 563 включения в основной массе занимают до 50% шлифа. Они имеют размеры 5–70 мкм, доминирует 20 мкм. Крупные пластинки слюды и вытянутые обломки кристаллов ориентированы параллельно поверхности. Большинство включений составляет кварц, кали-натровые полевые шпаты, мусковит и неидентифицированная фаза с теоретической формулой $(\text{Mg,Fe})_2(\text{Al,Si})_2\text{O}_6$. Присутствуют крупные обломки альбита (до 65 мкм); включения меньшего размера представлены гематитом и оксидом титана (анатаз или рутил). Отмечаются единичные включения коллофана (апатита) (табл. 5).

С точки зрения элементного состава формовочной массы, образцы демонстрируют достаточную однородность. Можно заметить закономерность в содержании железа, магния и титана: в тесте пиксиды № 235 этих элементов обнаружено наибольшее количество, а в № 315 – наименьшее. Формовочные массы миски № 563 и солонки № 315 оказываются близки по содержанию большинства элементов, но по некоторым существенно различаются: тесто миски № 563 содержит К в пределах 1,73%, Ti – 2,12%, солонки № 315 – К в пределах 4,06%, Ti – 0,27% (табл. 3).

В шлифах была измерена толщина покрытия поверхности («лак») – в среднем, она составляет ок. 30 мкм (рис. 8), но покрытие миски № 563 имеет малую толщину (до 10 мкм) и содержит много пор размером 0,1–1 мкм, а солонки № 315 – максимально пористое (в верхней части) и толстое (до 35 мкм). В трех образцах отмечается доминирование оксида калия (K_2O ; поташ) в «лаке» (№ № 235, 496, 563); во всех шлифах в лаковом слое отмечено повышенное содержание оксида алюминия (Al_2O_3 ; корунд), основных составляющих образовавшегося при высокотемпературном обжиге стекловидного покрытия (табл. 4). В целом, набор доминирующих элементов в «лаковом» слое стандартен [32]. Элементный состав слоя покрытия у всех образцов существенно отличался от состава основной формовочной массы. Во всех случаях они содержат больше железа и алюминия, меньше кальция. «Лак» пиксиды № 235 и кружки № 496 содержит больше калия, по сравнению с формовочной массой, он имеет наиболее плотные и однородные слои (табл. 4).

Дополнительно была построена диаграмма рассеяния по соотношению K/Si, Fe/Si: в отдельную группу по этому соотношению «выпали» данные по слою покрытия («лаку») и формовочной массы (теста) для солонки № 315 и миски № 563, тогда как данные по соотношению K/Si, Fe/Si в «лаковом» слое и тесте пиксиды № 235 и кружки № 496 отстоят отдельно и от этой группы, и друг от друга (рис. 9). Аналогично диаграмма рассеяния была построена по соотношению Al/Si, Fe/Si: здесь наблюдается иная картина – в «лаке» только солонка № 315 отличается от общей группы, сформированной тремя образцами; по соотношению пар Al/Si, Fe/Si формовочная масса пиксиды № 235 и миски № 563 составляют одну группу, тогда как образцы солонки № 315 и кружки № 496 отстоят отдельно и от этой группы, и друг от друга. Предположительно, степень измельчения глиняной суспензии на поверхности солонки № 315 была значительно ниже, чем у остальных (рис. 8), возможно, также был нарушен режим дегидратации и декарбонизации, что привело к образованию вторичной пористости [33].

Для этих двух сосудов: солонки № 315 и кружки № 496, минералогический состав формовочной массы был дополнительно исследован методом *рентгеновской дифракции*. Одними из основных фаз в керамическом тесте солонки № 315 оказались магнетит (Fe_3O_4), шпинель (MgAl_2O_4) и доломит; также определенную долю занимают кварц и полевой шпат (низкий альбит). Более сложный состав наблюдается у кружки № 496: основные фазы принадлежат кварцу, диопсиду, полевым шпатам, в частности, микроклину (KAlSi_3O_8); в небольших количествах в пробе зафиксированы также гематит, магнетит, хлоритоид (гидроксидный алюмосиликат) и следы родохрита.

Детализированные данные к минералогической характеристике керамического теста сосудов дали результаты анализа по методу *рамановской спектроскопии*. Анализ лакового

покрытия образцов показал, что основная составляющая их – магнетит (табл. 6), только для двух образцов было зафиксировано присутствие аморфного углерода (№ 315, 563), в лаке миски № 563 также зафиксировано присутствие следов гипса, а в лаке калафа № 376 – следы неопределимой фазы. Чёрное покрытие большинства образцов давало достаточно явные пики магнетита, однако «лаки» миски № 563 и солонки № 315 отличались от остальных: в них наблюдался более слабый пик магнетита, а также присутствовали толстые пики в районе 1340–1600, характерные для аморфного углерода.

Формовочная масса всех исследованных образцов (табл. 7) представлена гематитом ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$); полевые шпаты выявлены в тесте образцов № 235, 376, 563; кварц – в тесте образцов № 376, 505, 563; единично зафиксировано присутствие гипса (№ 376, 563), альбита (№ 505), полосы магнетита (№ 563), следы аморфного углерода (№ 362.17, 505).

Дискуссия. Проведенными анализами зафиксировано присутствие первичных минералов в формовочной массе (прежде всего, кварц), также зафиксировано присутствие значительно-го объема кальция и обжигаемых минералов [33]. Кварц, относящийся к первичным минералам, выявлен во всех исследованных образцах, он сохраняется без структурных изменений при обжиге до 1000°C . К первичным минералам формовочной массы также относится кальций (Са, СаО); глины, содержащие менее 6% оксида кальция, считаются неизвестковыми – в нашей выборке только два сосуда (миски № 362.17, 563) по данным СЭМ-ЭДС могут быть условно отнесены к таким типам глин, источник которых может быть расположен вблизи метаморфических пород¹⁰; небольшое количество кальцита в керамическом тесте указывает на возможность проводить обжиг при температуре ниже 750°C [34]. Но для этих сосудов такое низкое содержание кальция может быть объяснено и по-другому: по данным рентгеновской томографии, в тесте зафиксировано максимальное количество пор (по крайней мере, для № 563). Здесь можно предположить влияние процесса разложения карбонатов в жидкую фазу, проходящих при температуре обжига около 800°C – это приводит к образованию вторичной пористости [33].

Из условно известковых глин¹¹, судя по результатам анализов, были выполнены пиксиды № 235, солонка № 315, калаф № 376, кружка № 496, что указывает на другой источник глины (вблизи мраморов, доломитов, неогеновых отложений) [34]: тесты этих образцов содержат негашеную известь (СаО; табл. 4), которая образуется только при обжиге известковых глин выше 850°C [9]. На температуру обжига до 1000°C миски № 505 косвенно указывает фаза альбита, который, как и калиевый полевой шпат, стабилен до этой температуры. Для солонки № 315 температура обжига устанавливается более достоверно по присутствию фазы шпинели (MgAl_2O_4): кристаллы шпинели начинают образовываться при температуре выше 800°C , полностью формируются при $900\text{--}950^\circ\text{C}$. В то же время, доломит, зафиксированный в тесте этой же солонки, начинает разлагаться уже при температуре 750°C ¹² [35]. По наличию диопсида, возникающего в результате реакции свободной извести с обожженной глиной, температура обжига кружки № 496 может быть определена выше $750\text{--}850^\circ\text{C}$ [9].

В то же время, в исследованных образцах керамики зафиксированы следы присутствия, прежде всего, анатаза (TiO_2), переходящего в рутил в диапазоне $750\text{--}950^\circ\text{C}$ [35]. О температуре обжига в диапазоне от 500 до 750°C свидетельствует также присутствие фазы микроклина (KAlSi_3O_8) в тесте кружки № 496, а также следов хлоритоида. Присутствие фазы хлоритоида (спутника мусковита), даже в таком небольшом количестве (2%) – крайне необычно, так как этот минерал разлагается в диапазоне температур $300\text{--}500^\circ\text{C}$ [36]; скорее всего, этот вариант полевого шпата изначально присутствовал в большем объеме в керамическом тесте. Судя по данным рентгеновской томографии, наибольший объем включений присутствовал в формовочной массе пиксиды № 235 и калафа № 376; для пиксиды № 235, где зафиксировано самое широкое распределение пор по размеру с максимальным значением $\sim 6,2$ мм, можно предположить позднюю стадию спекания, в отличие от остальных сосудов [37].

¹⁰ Низкое содержание кальция может указывать на т.н. «кальцитовую закалку» [34].

¹¹ Кальцит может вырастать в порах археологической керамики в ходе постдепозиционных процессов, так что его присутствие не всегда связано с обжигом.

¹² Предполагаем его большее изначальное присутствие в формовочной массе данного образца.

Об условиях обжига в восстановительной атмосфере, прежде всего, свидетельствует присутствие гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) (табл. 7) в формовочной массе сосудов; в случае с миской № 563 одновременное присутствие полосы магнетита говорит о неполном окислении [9]. В составе черного покрытия (лака) всех образцов обнаружен магнетит, в двух образцах (№ 315, 563) – фаза аморфного углерода. Технология получения такого покрытия заключалась во временном прекращении подачи кислорода в короткий промежуток времени при температуре от 1000 до 850–800°С [9; 32]. Это приводило к началу восстановления в поверхностном слое, где формировались черные нанокристаллы магнетита [10].

Заключение. Проведенные аналитические исследования методами рентгеновской томографии, дифракции, рамановской спектроскопии и СЭМ-ЭДС позволяют совокупно сделать следующие предварительные общие заключения по составу формовочной массы и технологии обжига миниатюрных сосудов второй и третьей четвертей V – второй четверти IV в. до н.э.

Для изготовления миниатюрных сосудов из погребений №№ 235, 315, 362, 376, 505, 496, 563 некрополя Волна 1 использовалась условно известковая глина. Учитывая имеющиеся данные о процессе вторичного насыщения кальцием керамики, в частности, из погребений, мы опираемся здесь на данные по рентгеновской томографии. По крайней мере, по соотношению количества и размера пор с объемом формовочной массы выделяются пиксиды № 235, солонка № 315, миска № 362.17 и кружка № 496: наличие этих пор мы интерпретируем как явление вторичной пористости, возникшей в процессе разложения карбонатов при температуре 800°С и выделению газа CO_2 . Соответственно, мы предполагаем большее изначальное содержание кальция в глине исследованных сосудов; это предположение подтверждается и присутствием некоторых минералов в формовочной массе, таких как доломит, диопсид.

Формовочная масса пиксиды № 235, солонки № 315, калафа № 376, кружки № 496, мисок № 505 и № 563 содержит следующие минералы: полевые шпаты, альбит, мусковит, апатит и анатаз-рутил, а также доломит, шпинель, диопсид. В тесте сосудов также присутствуют зерна кварца без следов их преобразования под воздействием высокой температуры, и негашеная известь. Это косвенно указывает на температуру обжига в диапазоне, преимущественно от 800 до 900°С. Этому диапазону, в целом, не противоречат и зафиксированные следы присутствия минералов и соединений, распад которых начинается уже при температуре от 500°С; скорее, они указывают на их значительно большую изначальную долю в тесте и краткий временной режим высокотемпературного обжига.

Из общего ряда данных по составу формовочной массы выбивается миска № 362.17 – в ней не удалось зафиксировать значительной доли включений минералов и, по данным СЭМ-ЭДС, она характеризуется содержанием $\text{Ca} < 6\%$. Мы предполагаем, что данное явление явилось результатом высокой температуры обжига на финальном этапе (в районе 1000°С) в большем, чем в других исследованных случаях, временном диапазоне, когда минералы начали процесс своего разложения.

Также интересные результаты дала миска № 563: присутствие магнетита в тесте указывает на обжиг в печи с недостаточной вентиляцией [35], а следы гипса в лаковом слое и в составе формовочной массы говорят о несколько иной рецептуре формовочной массы. По-видимому, здесь присутствие гипса в составе теста также привело, в том числе, к значительному объему пористости.

В исследованных шлифах в лаковом слое зафиксировано присутствие корунда (вероятно, герцинит-железной шпинели [9]), низкое содержание Са и высокое содержание Fe, Al и K (за исключением солонки № 315) по отношению к формовочной массе, что в целом указывает на классическую рецептуру получения лакового покрытия на исследованной выборке миниатюрных сосудов и его обжиге в температурном режиме в пределах 850–1000°С. Чёрное покрытие большинства образцов давало достаточно явные пики магнетита, однако «лаки» миски № 563 и солонки № 315 отличались от остальных: в них наблюдался более слабый пик магнетита, а также присутствовали толстые пики в районе 1340–1600, характерные для аморфного углерода – предполагается, что такой углерод попал в слой лака из топлива [9].

В состав для покрытия дополнительно вводился поташ (K_2O), лак пиксиды № 235 и кружки № 496 содержит больше калия по сравнению с формовочной массой, он имеет наиболее

плотные и однородные слои лакового покрытия. Превышение количества калия в слое лака над его содержанием в тесте позволяет нам по косвенным данным с некоторой долей вероятности исключить глины в пригороде Амаруси, характеризующиеся его повышенным содержанием, из числа возможного источника сырья [7, р. 97]. Толщина слоя лака разнится от 10 до 35 мкм; максимальная его толщина, а также повышенное насыщение порами зафиксированы для солонки № 315. Здесь мы можем говорить о дефекте подготовки лакового покрытия: по-видимому, сказалась низкая степень измельчения глиняной суспензии, что привело к образованию масштабной вторичной пористости слоя покрытия в результате дегидратации и декарбонизации. Итогом стала низкая сохранность покрытия, его слоистость.

На данный момент, на основании проведенных исследований, к сожалению, невозможно говорить о причинах разницы в цвете лаковых покрытий однотипных мисок № 362.17 и 505, однако опираясь на результаты работ, в том числе по реконструкции процесса изготовления посуды такого рода [7, р. 97, 98; 38, S. 13–35; 39, р. 347–351; 40, р. 15], можно предполагать, что это стало следствием нарушения температурного режима обжига на второй фазе процесса в печи, где в числе прочих обжигалась миска № 505.

В дальнейшем расширение выборки сосудов, а также спектра методов их исследований позволит дополнить сведения о технологии изготовления, характере подготовки сырья и причинах различий в качестве и степени сохранности покрытий.

Таблица 1. Объемные характеристики керамических образцов из некрополя Волна 1

Образец	Общий объем, см ³	Пористость, %	Включения, %
235	82,2	0,35	0,19
315	44,7	0,69	–
362	87,8	0,06	0,02
362.17	29,7	0,31	0,02
376	70,1	0,26	0,35
505	28,8	0,45	0,02
496	52,8	0,09	–
563	44,5	0,62	0,01

Таблица 5. Состав включений в керамике до данным СЭМ-ЭДС (размер более 10 мкм)

Фаза	Кварц	К-ППШ	К-На ПШ	Альбит	Мусковит	(Mg,Fe) ₂ (Al,Si) ₂ O ₆	Гематит	TiO ₂	Апатит
№235	42	10	7	3	17	18	3	1	<1%
№315	42	4	7	14	14	14	4	1	<1%
№496	38	13	6	3	22	13	3	1	<1%
№563	46	8	3	8	21	10	3	1	<1%
№563	46	8	3	8	21	10	3	1	<1%

Таблица 6. Результаты аналитического исследования лакового покрытия для некоторых керамических образцов из некрополя Волна 1 по методу рамановской спектроскопии

	магнетит	неопр. фаза	гипс	углерод аморф.
П. 235	+			
П. 315	+			+
П. 362	+			
П. 376	+	+		
П. 496	+			
П. 563	+		+	+

Таблица 2. Результаты элементного анализа методом СЭМ-ЭДС керамических образцов из некрополя Волна I на растровом электронном микроскопе CX-200P Сохет (без пробоподготовок)

		Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Ba
235	лак	0,63	7,87	19,99	47,39		0,74	2	7,45	1,12	1,1	10,49	
	лак	0,64	6	19,78	48,84		1,22	2,82	8,24	1,03		9,78	
	лак	0,71	5,90	16,39	47,11			3,49	10,25	1,39		13,80	
	лак	0,69	6,31	16,24	48,13			2,26	9,60	1,27		14,89	
	лак	0,78	5,50	14,78	39,66			3,42	11,37	1,52		22,33	
	сумма	0,69	6,31	17,43	46,22		0,39	2,79	9,38	1,26	0,22	14,25	
	гранита	1,70	3,69	27,06	48,28			4,93	4,08	0,80		8,46	
	тесто	1,76	2,52	31,69	47,62			5,86	1,41	0,53		8,20	
	тесто	2,04	2,42	31,74	48,04			6,05	1,08			8,37	
	тесто	1,39	2,30	28,21	42,40		0,66	6,21	3,29	1,11		14	
	сумма	1,72	2,73	29,67	46,58		0,16	5,76	2,46	0,61		9,75	
362.17	Лак	1,38	3,20	31,67	45,31		1,23	2,98	4,39	0,48		9,35	
	Лак	1,28	2,99	26,63	38,50		10,11	3,06	10,60	0,45		6,12	
	Лак	1,53	3,20	33,81	44,97		1,06	3,81	1,53	0,60		9,50	
	Лак	1,29	3,72	26,24	46,28		5,02	2,92	6,20			8,32	
	сумма	1,37	3,27	29,58	43,76		4,35	3,19	5,68	0,38		8,32	
	Тесто	1,18	4,85	16,85	55,14			3,05	5	0,83		12,90	
	Тесто	1,04	5,33	18,42	53,89			3,47	5,89	0,71		11,27	
	Тесто	1,34	5,64	20,40	50,75			2,94	6,28	0,89		11,76	
	сумма	1,18	5,27	18,55	53,26			3,15	5,72	0,81		11,97	
376	Лак	1,47	2,19	30,82	42,64	0,38	2,22	6,28	2,27	0,46		11,13	
	Лак	1,32	2,24	31,58	43,05		0,56	6,66	1,13	0,61		12,85	
	Лак	0,78	2,29	16,98	27,56	0,88	24,53	2,98	17,14	0,43		5,87	
	Лак	1,29	2,08	27,39	38,53		8,93	4,86	6,63			9,48	0,80
	Лак	0,97	2,46	29,07	40,17	0,84	1,84	6,18	2,56	0,72		14,94	
	сумма	1,16	2,25	27,16	38,39	0,42	7,61	5,39	5,94	0,44		10,85	
	Тесто	1,15	1,89	12,03	30,07		28,36	1,42	20,42	0,48		4,18	
	Тесто	0,57	1,95	11,08	27,59		28,73	1,67	23,05			5,36	
	Тесто	1,03	1,86	14,15	32,66		20,28	2,67	17,26	1,34		8,24	
	сумма	0,91	1,9	12,42	30,1		25,79	1,92	20,24	0,6		5,92	
505	Лак	0,76	5,18	19,74	52,04			3,47	5,38	1,26		12,17	
	Лак	0,82	4,49	18,80	51,76			3,60	6,38	1,32		12,83	
	Лак	0,63	4,88	18,49	53,15			3,51	5,95	1,10		12,28	
	Лак	0,75	4,05	17,97	50,12			3,78	6,80	1,20		15,33	
	сумма	0,74	4,65	18,75	51,76			3,59	6,12	1,22		13,15	

Таблица 3. Результаты элементного анализа методом СЭМ-ЭДС керамических образцов из некрополя Волна 1 на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA Сонтраст LМН (без пробоподготовок)

	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe
235	Лак	39,34	0,22	1,07	16,98	22,64	0,09		5,92		0,5			13,03
	Лак	37,76	0,43	1,09	16,87	22,28	0,08	0,08	6,32		0,49	0,11		14,5
	Лак	39,537	0,45	1,12	17,03	22,45			5,77		0,51			13,11
сумма		38,89	0,36	1,09	16,96	22,45	0,05	0,02	6		0,5			13,54
	тесто	40,26	0,68	5,75	9,97	16,8		0,47	2	1,84	0,29	0,08	0,13	27,13
	тесто	22,4	0,27	1,89	5,71	1			4,7	14,3	1,05		0,61	33,79
	тесто	43,92	0,59	3,43	9,56	24,98		0,54	2,88	5,89	0,57			7,64
сумма		35,52	0,51	3,69	8,41	14,26		0,33	3,19	7,34	0,63			22,85
315	Лак	45,56		1,43	16,23	22,94	0,09		2,53	0,53	0,33			10,35
	Лак	45,45		1,4	16,36	22,72	0,11		2,72	0,39	0,35			10,49
	Лак	45,34		1,32	16,32	22,74			2,72	0,43	0,35			10,77
сумма		45,45		1,38	16,3	22,8	0,06		2,65	0,45	0,34			10,53
	Тесто	47,06	1,18	1,51	15,44	26,27			6,89		0,31			1,34
	Тесто	33,51	0,85	1,74	5,52	12,17	0,19	0,12	2,6	0,52	0,13			42,63
	Тесто	46,1	0,9	2,63	8,71	27,85	0,13	0,05	0,17	2,71	0,39		0,18	5,28
сумма		42,22	0,97	1,96	9,89	22,09	0,1	0,01	0,09	4,06	1,8	0,27	0,06	16,41
496	Лак	44,22	0,8	1,31	16,05	21,47			6,26	0,57	0,43			8,89
	Лак	44,06	0,79	1,3	15,69	21,38			5,98	0,8	0,55			9,46
	Лак	44,01	0,77	1,34	15,91	21,24			6,03	0,64	0,38			9,67
сумма		44,09	0,78	1,31	15,88	21,36			6,09	0,67	0,45			9,34
	Тесто	45,57	0,6	2,93	9,85	26,12	0,15	0,16	2,97	4,95	0,54	0,06	0,09	6,01
	Тесто	41,42		9,45	13,91	14,94			0,87	0,65			0,14	18,63
сумма		43,49	0,3	6,19	11,88	20,53	0,07	0,08	1,92	2,8	0,27	0,03	0,11	12,32
563	Лак	45,55	0,35	2,16	15,56	23,13			2,7	1,13	0,3		0,12	8,98
	Лак	45,53	0,41	1,74	15,76	23,15			3,1	1,01	0,37			8,93
	Лак	45,76	0,42	1,97	16,35	23,03			2,87	0,83	0,29			8,47
	Лак	45,71	0,46	1,73	15,99	23,54			5,01	0,65	0,26			6,63
сумма		45,63	0,41	1,9	15,91	23,21			3,42	0,9	0,3		0,03	8,25
	Тесто	40,49	0,25	7,96	11,6	15,54	0,16		0,85	0,62	0,12		0,35	22,06
	Тесто	43,3	0,5	3,36	8,4	20,88		0,2	1,88	1,81	7,63			12,03
	Тесто	37,17	0,9	3,66	7,78	14,99	0,17	0,29	1,25	1,93	0,2			31,4
	Тесто	46,18	0,72	2,88	9,47	27,57	0,06	0,04	0,18	2,95	3,38	0,04	0,07	5,89
сумма		41,78	0,59	4,46	9,31	19,74	0,09	0,01	0,16	1,73	1,93	0,01	0,1	17,84

Таблица 4. Результаты исследований шлифов для некоторых керамических образцов из некрополя Волна 1

		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	TiO ₂	FeO	Cr ₂ O ₃	CaO	MnO	SO ₃
235	Лак	0,55	1,67	30,03	44,64	0,2	6,58	0,76	15,57				
	Лак	0,54	1,68	29,45	43,23	0,16	6,92	0,74	17,08	0,14			
	Лак	0,57	1,76	30,24	44,48		6,44	0,72	15,73				
Лак сумма	Тесто	0,55	1,7	29,9	44,11	0,12	6,64	0,74	16,12	0,04			
	Лак	0,79	5,65	17,71	52,55	0,13	3,44	1,08	9,93	0,09	7,8	0,2	0,04
	Лак	0,48	3,58	29,41	49,49		3,26	0,50	11,56		1,58	0,16	
563	Лак	0,55	2,88	29,78	49,53		3,74	0,62	11,48		1,42		
	Лак	0,57	3,26	30,89	49,27		3,46	0,49	10,89		1,16		
	Лак	0,63	2,87	30,22	50,36		6,04	0,44	8,53		0,91		
Лак сумма	Тесто	0,55	3,14	30,07	49,66		4,12	0,51	10,61		1,26	0,04	
	Лак	0,97	4,78	17,9	58,99	0,14	3,55	0,94	7,58	0,05	4,72	0,1	0,09
	Лак	1,08	2,17	30,33	45,94		7,54	0,72	11,43		0,80		
496	Лак	1,07	2,16	29,64	45,73		7,20	0,92	12,16		1,12		
	Лак	1,04	2,22	20,07	45,43		7,26	0,63	12,45		0,90		
	Лак	1,06	2,18	26,68	45,7		7,33	0,75	12,01		0,94		
Лак сумма	Тесто	0,81	4,86	18,61	55,84	0,33	3,58	0,9	7,73	0,08	6,92	0,12	0,05
	Лак		2,37	30,67	49,08	0,22	3,05	0,56	13,31		0,75		
	Лак		2,32	30,90	48,61	0,26	3,28	0,58	13,50		0,55		
315	Лак		2,19	30,84	48,65		3,27	0,59	13,86		0,60		
	Лак		2,29	30,8	48,78	0,16	3,2	0,57	13,55		0,63		
	Лак		2,29	30,8	48,78	0,16	3,2	0,57	13,55		0,63		
Лак сумма	Тесто	1,19	4,59	16,68	58,4	0,21	3,24	0,78	7,19	0,05	7,17	0,16	0,15

Таблица 7. Результаты аналитического исследования формовочной массы для некоторых керамических образцов из некрополя Волна 1 по методу рамановской спектроскопии

	гипс	гематит	полевые шпаты	кварц	альбит	магнетит	углерод аморф.
П. 235		+	+				
П. 362		+					+
П. 376	+	+	+	+			
П. 505		+		+	+		+
П. 563	+	+	+	+		+	
П. 563	+		+	+			



Рис. 1. Макрофото скола кружки № 496



Рис. 2. Выборка миниатюрных сосудов из некрополя Волна 1 (номер дан по погребению): 235 – пиксида; 315 – солонка; 362, 362.17, 505, 563 – миска; 376 – калаф; 496 – кружка

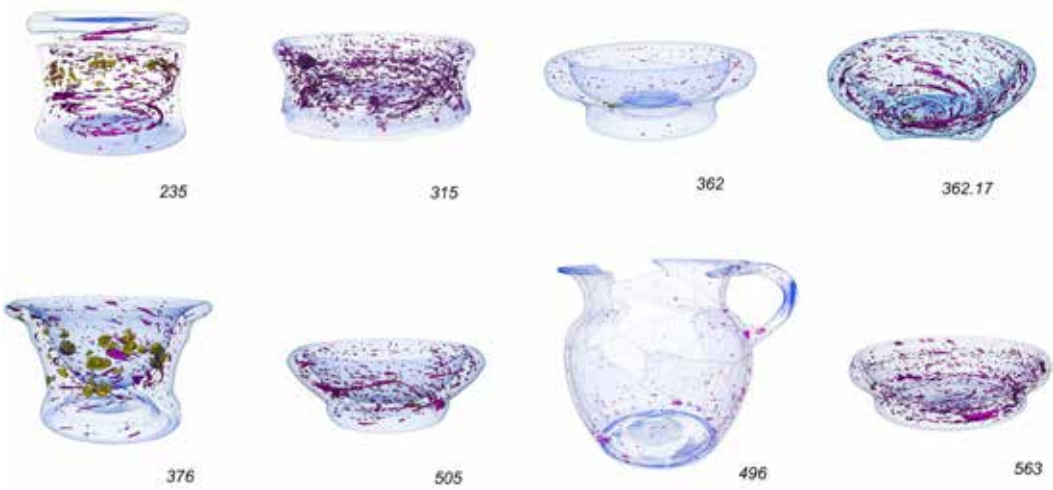


Рис. 3. Результаты рентгеновской томографии, восстановленные из данных рентгеновской томографии трехмерные модели пиксиды (235), солонки (315), мисок (362, 362.17, 505, 563), калафа (376), кружки (496), с выделенным поровым пространством (фиолетовый цвет) и включениями (желтый цвет)

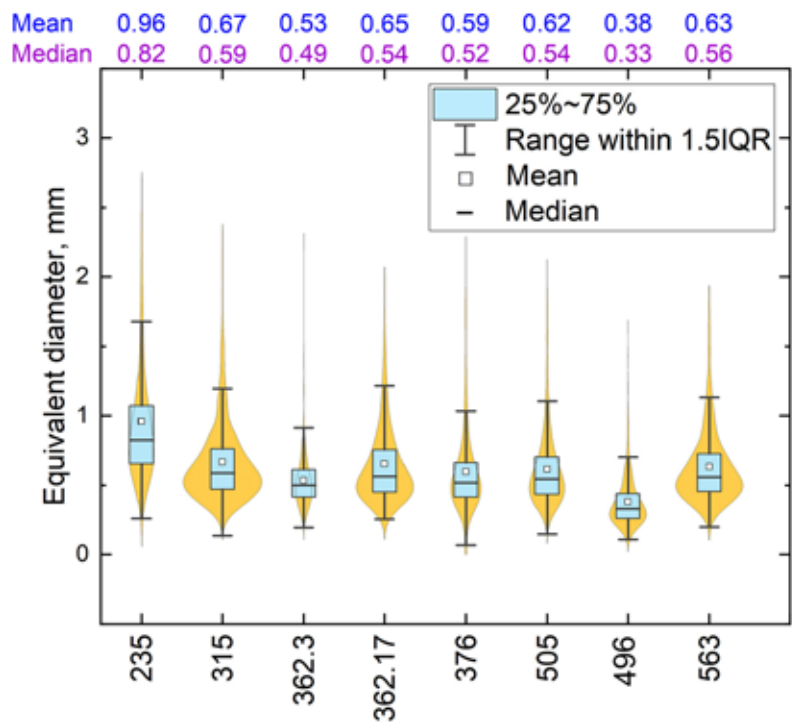


Рис. 4. Скрипичный график распределения данных и плотности вероятности эквивалентного диаметра пор

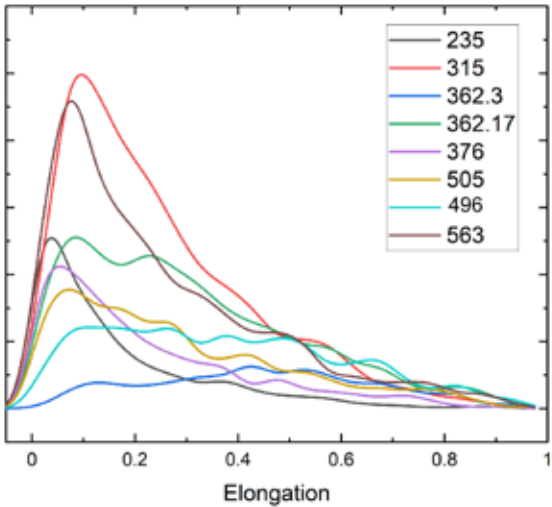


Рис. 5. Плотность распределения вероятности вытянутости пор в исследуемых керамических сосудах

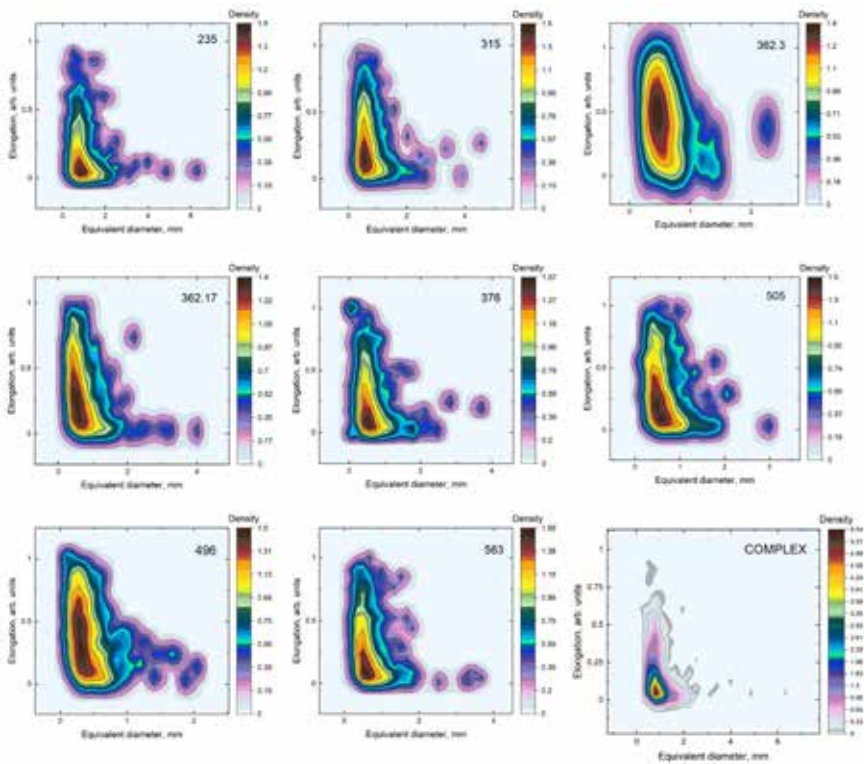


Рис. 6. Контурные диаграммы зависимости размера пор от их вытянутости и обобщенная контурная диаграмма всех исследованных керамических объектов

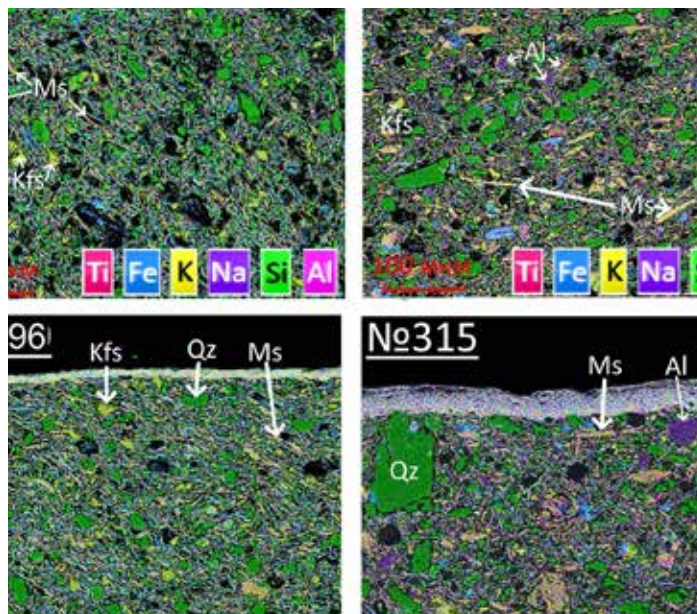


Рис. 7. Карта микропримесей в составе формовочной массы образцов, картирование выполнено методом электронной сканирующей микроскопии

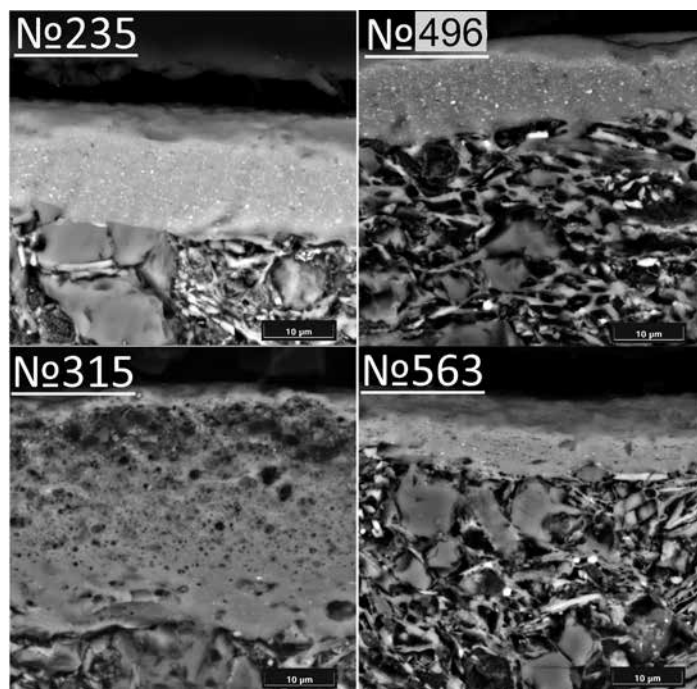


Рис. 8. Микрофотографии образцов № 235, 315, 496, 563, полученные с помощью обратного электронного рассеяния – сравнение внешнего (лакового) слоя и внутреннего (формовочной массы) слоя

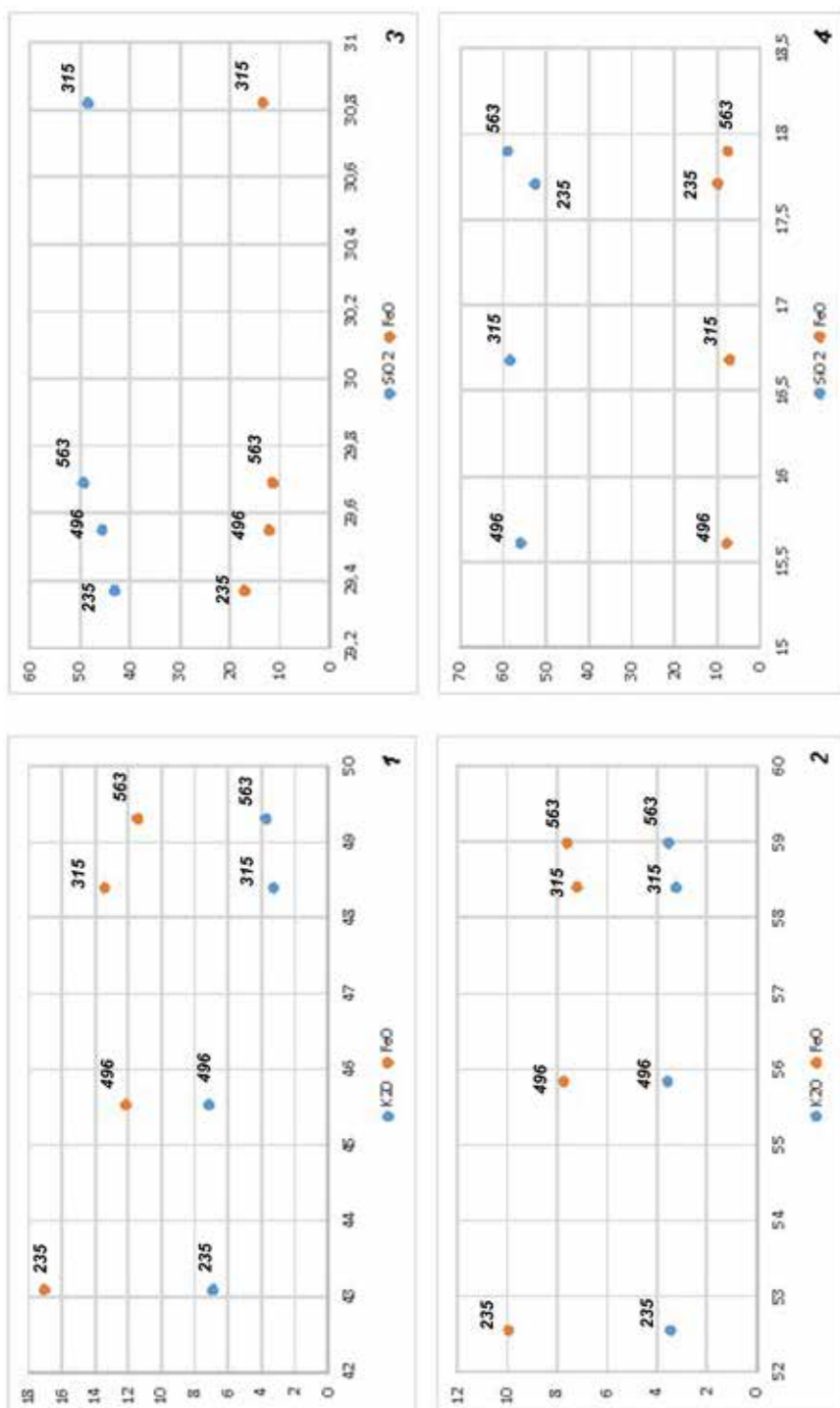


Рис. 9. Диаграммы рассеяния по соотношениям: 1 – K/Si, Fe/Si в «лаке»; 2 – K/Si, Fe/Si в тесте; 3 – Al/Si, Fe/Si в «лаке»; 4 – Al/Si, Fe/Si в тесте

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мимоход Р.А., Сударев Н.И., Успенский П.С. Новый «городской» некрополь архаического и классического времени на Таманском полуострове (предварительная информация) // Древности Боспора. 2017. № 21. С. 294–310.
2. Мимоход Р.А., Сударев Н.И., Успенский П.С. Некрополь Волна-1 (2017 г.) (Краснодарский край, Таманский полуостров) // Города, селища, могильники. Раскопки 2017. М.: ИА РАН, 2018. С. 220–231. (Материалы спасательных археологических исследований. Т. 25).
3. Цокур И.В., Сударев Н.И., Шаров О.В. Волна 1. Некрополь архаического – эллинистического периодов на Таманском полуострове: В двух частях. Часть 1. М.: ИА РАН, 2022. 400 с. (Материалы спасательных археологических исследований. Т. 30).
4. Егорова Т.В., Сударев Н.И., Берлизов А.Н. Миниатюрные миски и солонки в погребальном обряде некрополя Волна 1 // Stratum plus. 2025. № 3. С. 313–330.
5. Kotitsa Z., Schüssler U. Zinn auf Keramik: Entstehung und Verwendung eines Statussymbols in Makedonien // Archäologischer Anzeiger. 2002. Pt. 2. P. 65–84.
6. Kotitsa Z., Adusumalli C.-I., Chiaradia M. Tin-foiled ceramics from Macedonia // Modern Trends in Scientific Studies on Ancient Ceramics / eds. V. Kilikoglou et al. Oxford: Archaeopress, 2002. P. 157–162. (BAR International Series 1011).
7. Jons R. The Decoration and Firing of Ancient Greek Pottery: A Review of Recent Investigations // Advances in Archaeomaterials, 2021. Vol. 2. P. 67–127.
8. Scarpelli R., Robustelli G., Clark R.J.H., De Francesco A.M. Scientific investigations of the provenance of the black glazed pottery from Pompeii: a case study // Mediterranean Archaeology and Archaeometry. 2017. Vol. 17, no. 2. P. 1–10.
9. Akyuz S., Celik S., Kurap G., Ozel A.E., Basaran S. Investigations of black and red figure pottery shards and local clay, excavated at Ainos (Enez-Turkey), by multiple analytical techniques // Vibrational Spectroscopy. 2023. Vol. 129. 103613.
10. Aloupi-Siotis E. Ceramic technology: hoe to characterise black Fe-based glass-ceramic coatings // Archaeological and Anthropological Sciences. 2020. Vol. 12. Article No. 191.
11. Montana G. Ceramic raw materials: hoe to recognize them and locate the supply basin – mineralogy, petrography // Archaeological and Anthropological Sciences. 2020. Vol. 12. Article No. 175.
12. Ospitali F., Sabetta T., Tullini F., Nannetti M.C., Di Lonardo G. The role of Raman microspectroscopy in the study of black gloss coatings on Roman pottery // Journal of Raman Spectroscopy. 2005. Vol. 36. P. 18–23.
13. Wopenka B., Popelka R., Pasteris J.D., Rotroff S. Understanding the Mineralogical Composition of Ancient Pottery through Raman Microprobe Spectroscopy // Applied Spectroscopy. 2002. Vol. 56, no. 10. P. 1320–1328.
14. Cianchetta I., Maish J., Saunders D., Walton M., Mehta A., Forane B., Trentelman K. Investigating the firing protocol of Athenian pottery production: A Raman study of replicate and ancient sherds // Journal of Raman Spectroscopy. 2015. Vol. 46. P. 996–1002.
15. Егорова Т.В. К вопросу об определении производственных центров импортной чернолаковой керамики из Северного Причерноморья // Древности Боспора. 2024. Т. 29. С. 142–156.
16. Kenessarin M., Nazarov K., Smirnova V., Kichanov S., Torezhanova N., Myakisheva O., Zhomartova A., Mukhametuly B., Nemkayeva R., Myrzabekova E. An Analysis of the Pore Distribution in Ceramic Vessels from the Akterek Burial Archeological Site Using Neutron Tomography Data // Heritage. 2025. Vol. 8, issue 10. 210.
17. Егорова Т.В. Традиционный набор чернолаковой посуды в греческих погребальных комплексах Азиатского Боспора конца VI – конца IV в. до н. э. (по материалам некрополя Волна 1) // Stratum plus. 2024. № 3. С. 213–231.
18. Sparkes B.A., Talcott L. Black and Plain pottery of the 6th, 5th, 4th centuries B.C. Princeton: American School of Classical Studies at Athens, 1970. 500 p. (The Athenian Agora XII).
19. Rotroff S.I. Hellenistic Pottery. Athenian and Imported Wheelmade Table Ware and Related Material. Princeton: American School of Classical Studies at Athens, 1997. 612 p. (The Athenian Agora XXIX).
20. Knigge U. Der Südhügel. Berlin: W. de Gruyter, 1976. 211 S. (Kerameikos. Ergebnisse der Ausgrabungen. Band IX).
21. Knigge U. Der bau Z. München: Hirmer Verlag, 2005. 269 S. (Kerameikos. Ergebnisse der Ausgrabungen. Band XVII).
22. Егорова Т.В. Античная чернолаковая керамика из собрания Государственного музея изобразительных искусств имени А.С. Пушкина. М.: НП-Принт, 2017. 203 с.
23. Rotroff S.I., Oakley J.H. Debris from a Public Dining Place in the Athenian Agora. Princeton: American School of Classical Studies at Athens, 1992. 170 p. (Hesperia. Suppl. 25).
24. Егорова Т.В. К вопросу о продолжительности использования чернолаковой посуды (по материалам Пантикалея и Танаиса) // Античный мир и археология. 2019. Т. 19. С. 242–257.
25. Kuze-Götte E., Tancke K., Vierneisel K. Die Nekropole von der Mitte des 6. bis zum Ende des 5. Jahrhunderts. München : Hirmer Verlag, 1999. 180 S. (Kerameikos. Ergebnisse der Ausgrabungen. Band VII,2).

26. Hermary A., Panayotova K., Baralis A., Damyanov M., Riapov A. Apollonia du Pont (Sozopol). La necropole de Kalfata (Ve–IIIe s. av. J.-C.). Paris: Errance, 2010. 300 p.
27. Кашаев С.В. Раскопки некрополя Артюшенко-2 в 2014–2018 гг. // Археологические вести. 2019. Вып. 25. С. 101–112.
28. Егорова Т.В. Краснофигурная и чернолаковая керамика. Каталог-приложение // Рукавишников И.В., Бейлин Д.В., Федосеев Н.Ф. Курган Госпитальный. М.: ИА РАН. 2022. С. 163–210. (Материалы спасательных археологических исследований. Т. 28).
29. Chechulina I. From Athens to Olbia Pontica: the artistry of Black-Glazed ware. Kyiv: IA NAS of Ukraine, 2024.
30. Williams Ch.K. Corinth, 1978: Forum Southwest // *Hesperia*. 1979. Vol. 48 (2). P. 105–144.
31. Hanesch M. Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy) hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studies // *Geophysical Journal International*. 2009. Vol. 177, No. 3. P. 941–948.
32. Solard B., Amicone S., Aloupi-Siotis E., Heinze L., Berti F., Lambrugo K., Berthold Ch. Back to black: a mineralogical and chemical characterization of Atticising fourth century BCE black gloss ware // *Archaeological and Anthropological Sciences*. 2023. Vol. 15. Article no. 135.
33. Grammatikakis I.E., Kyriakidis E., Demadis K.D., Diaz A.C., Leon-Reina L. Mineralogical Characterization and Firing Temperature Delineation on Minoan Pottery, Focusing on the Application of Micro-Raman Spectroscopy // *Heritage*. 2019. Vol. 2. P. 2652–2664. doi:10.3390/heritage2030163.
34. Santosa Y., Kondopoulou D., Papadopoulou L., Saridakis N., Aidona E., Rathossic C., Serletis C. An archaeometric contribution to the study of Late Classic-Hellenistic ceramics of Northern Greece // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2020. Vol. 29. 102097.
35. Caner E., Güney B.A. Characterization of ceramic ware fragments from Aizanoi-Turkey by micro Raman, XRPD and SEM-EDX spectrometry // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2017. Vol. 177. P. 135–139.
36. Aseev V.A., Prokuratov D.S., Jolshin D.D., Mironov L.Yu., Bulygina N.A., Leonidova A.A., Ivanova T.I., Nikonorov N.V., Menu M.A. Ceramic floor tiles with yellow pigment from Kievan Rus': A technological study // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2024. Vol. 53. 104385.
37. Germinario Ch., Cultrone G., De Bonis A., Izzo F., Langella A., Mercurio M., Nodari L., Vyhnał Ch.R., Grifa C. μ -Raman spectroscopy as a useful tool for improving knowledge of ancient ceramic manufacturing technologies // *Applied Clay Science*. 2024. Vol. 25. 107347.
38. Winter A. Die Antike Glanztonkeramik: Praktische Versuche. Mainz am Rhein: Verlag Philipp Von Zabern, 1978.
39. Noble J.V. The Techniques of Painted Attic Pottery. London: Faber, 1988. 216 p.
40. The Colors of Clay: Special Techniques in Athenian Vases. Los Angeles: The J. Paul Getty Museum, 2006. 372 p.

REFERENCES

1. Mimokhod R.A., Sudarev N.I., Uspensky P.S. New “urban” necropolis of the archaic and classical times on the Taman Peninsula (preliminary information). *Drevnosti Bospora* [Antiquities of the Bosporus], 2017, no. 21, pp. 294–310.
2. Mimokhod R.A., Sudarev N.I., Uspensky P.S. Necropolis Volna-1 (2017) (Krasnodar Territory, Taman Peninsula). *Goroda, selishcha, mogil'niki. Raskopki 2017* [Cities, villages, burial grounds. Excavations 2017], Moscow, Institute of Archaeology RAS Publ., 2018, pp. 220–231. (Materials of rescue archaeological research. Vol. 25).
3. Tzokur I.V., Sudarev N.I., Sharov O.V. *Volna 1. Nekropol' arkhaiskogo – ellinisticheskogo periodov na Tamanskom poluostrove* [Volna 1. Necropolis of the Archaic – Hellenistic Periods on the Taman Peninsula]. Part 1. Moscow, Institute of Archaeology RAS Publ., 2022, 400 p. (Materials of rescue archaeological research. Vol. 30).
4. Egorova T.V., Sudarev N.I., Berlizov A.N. Small Bowls and Saltcellars in Funerary Rite of Volna 1 Necropolis. *Stratum plus*, 2025, no. 3, pp. 313–330.
5. Kotitsa Z., Schüssler U. Zinn auf Keramik: Entstehung und Verwendung eines Statussymbols in Makedonien. *Archäologischer Anzeiger*, 2002, Pt. 2, pp. 65–84.
6. Kotitsa Z., Adusumalli C.-I., Chiaradia M. Tin-foiled ceramics from Macedonia. V. Kilikoglou et al. (eds.), *Modern Trends in Scientific Studies on Ancient Ceramics*, Oxford, Archaeopress, 2002, pp. 157–162. (BAR International Series 1011).
7. Jons R. The Decoration and Firing of Ancient Greek Pottery: A Review of Recent Investigations. *Advances in Archaeomaterials*, 2021, vol. 2, pp. 67–127.
8. Scarpelli R., Robustelli G., Clark R.J.H., De Francesco A.M. Scientific investigations of the provenance of the black glazed pottery from Pompeii: a case study. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 1–10.
9. Akyuz S., Celik S., Kurap G., Ozel A.E., Basaran S. Investigations of black and red figure pottery shards and local clay, excavated at Ainos (Enez-Turkey), by multiple analytical techniques. *Vibrational Spectroscopy*, 2023, vol. 129, 103613.
10. Aloupi-Siotis E. Ceramic technology: hoe to characterise black Fe-based glass-ceramic coatings. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2020, vol. 12, article no. 191.

11. Montana G. Ceramic raw materials: hoe to recognize them and locate the supply basin – mineralogy, petrography. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2020, vol. 12, article no. 175.
12. Ospitali F., Sabetta T., Tullini F., Nannetti M.C., Di Lonardo G. The role of Raman microspectroscopy in the study of black gloss coatings on Roman pottery. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2005, vol. 36, pp. 18–23.
13. Wopenka B., Popelka R., Pasteris J.D., Rotroff S. Understanding the Mineralogical Composition of Ancient Pottery through Raman Microprobe Spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 2002, vol. 56, no. 10, pp. 1320–1328.
14. Cianchetta I., Maish J., Saunders D., Walton M., Mehta A., Forane B., Trentelman K. Investigating the firing protocol of Athenian pottery production: A Raman study of replicate and ancient sherds. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2015, vol. 46, pp. 996–1002.
15. Egorova T.V. On the issue of determining the production centers of imported black-glazed ceramics from the Northern Black Sea region. *Drevnosti Bospora* [Antiquities of the Bosporus], 2024, vol. 29, pp. 142–156.
16. Kenessarin M., Nazarov K., Smirnova V., Kichanov S., Torezhanova N., Myakisheva O., Zhomartova A., Mukhametuly B., Nemkayeva R., Myrzabekova E. An Analysis of the Pore Distribution in Ceramic Vessels from the Akterek Burial Archeological Site Using Neutron Tomography Data. *Heritage*, 2025, vol. 8, issue 10., 210.
17. Egorova T.V. Traditional Set of Black-Glazed Vessels in Greek Burial Complexes of the Asian Bosporus of the Late 6th – Late 4th Centuries BC (Based on the Materials from the Volna 1 Necropolis). *Stratum plus*, 2024, no. 3, pp. 213–231.
18. Sparkes B.A., Talcott L. *Black and Plain pottery of the 6th, 5th, 4th centuries B.C.* Princeton, American School of Classical Studies at Athens, 1970, 500 p. (The Athenian Agora XII).
19. Rotroff S.I. *Hellenistic Pottery. Athenian and Imported Wheelmade Table Ware and Related Material*. Princeton, American School of Classical Studies at Athens, 1997, 612 p. (The Athenian Agora XXIX).
20. Knigge U. *Der Südhügel*. Berlin, W. de Gruyter, 1976, 211 S. (Kerameikos. Ergebnisse der Ausgrabungen. Band IX).
21. Knigge U. *Der bau Z.* München, Hirmer Verlag, 2005, 269 S. (Kerameikos. Ergebnisse der Ausgrabungen. Band XVII).
22. Egorova T.V. *Antichnaia chernolakovaia keramika iz sobraniia Gosudarstvennogo muzeia izobrazitel'nykh iskusstv imeni A.S. Pushkina* [Antique black-lacquer ceramics from the collection of the A.S. Pushkin State Museum of Fine Arts]. Moscow, NP-Print Publ., 2017, 203 p.
23. Rotroff S.I., Oakley J.H. *Debris from a Public Dining Place in the Athenian Agora*. Princeton, American School of Classical Studies at Athens, 1992, 170 p. (Hesperia. Suppl. 25).
24. Egorova T.V. On the duration of use of black glaze tableware (based on materials from Panticapaeum and Tanais). *Antichnyi mir i arkheologiya* [The Ancient World and Archaeology], 2019, vol. 19, pp. 242–257.
25. Kuze-Götte E., Tancke K., Viernseil K. *Die Nekropole von der Mitte des 6. bis zum Ende des 5. Jahrhunderts*. München, Hirmer Verlag, 1999, 180 S. (Kerameikos. Ergebnisse der Ausgrabungen. Band VII.2).
26. Hermay A., Panayotova K., Baralis A., Damyanov M., Riapov A. *Apollonia du Pont (Sozopol). La necropole de Kalfata (Ve–IIIe s. av. J.-C.)*. Paris, Errance, 2010, 300 p.
27. Kashaev S.V. Excavations of the Artyushchenko-2 necropolis in 2014–2018. *Arkheologicheskie vesti* [Archaeological News], 2019, vol. 25, pp. 101–112.
28. Egorova T.V. Red-figure and black-glaze ceramics. Catalogue-supplement. Rukavishnikova I.V., Beilin D.V., Fedoseyev N.F. *Kurgan Gospital'nyi* [Hospital Kurgan], Moscow, Institute of Archaeology RAS Publ., 2022, pp. 163–210. (Materials of rescue archaeological research. Vol. 28).
29. Chechulina I. *From Athens to Olbia Pontica: the artistry of Black-Glazed ware*. Kyev, Institute of Archaeology NAS of Ukraine Publ., 2024.
30. Williams Ch.K. Corinth, 1978: Forum Southwest. *Hesperia*, 1979, vol. 48 (2), pp. 105–144.
31. Hanesch M. Raman spectroscopy of iron oxides and (oxy) hydroxides at low laser power and possible applications in environmental magnetic studies. *Geophysical Journal International*, 2009, vol. 177, no. 3, pp. 941–948.
32. Solard B., Amicone S., Aloupi-Siotis E., Heinze L., Berti F., Lambrugo K., Berthold Ch. Back to black: a mineralogical and chemical characterization of Atticising fourth century BCE black gloss ware. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2023, vol. 15, article no. 135.
33. Grammatikakis I.E., Kyriakidis E., Demadis K.D., Diaz A.C., Leon-Reina L. Mineralogical Characterization and Firing Temperature Delineation on Minoan Pottery, Focusing on the Application of Micro-Raman Spectroscopy. *Heritage*, 2019, vol. 2, pp. 2652–2664.
34. Santosa Y., Kondopoulou D., Papadopoulou L., Saridakis N., Aidona E., Rathossic C., Serletis C. An archaeometric contribution to the study of Late Classic-Hellenistic ceramics of Northern Greece. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2020, vol. 29, 102097.
35. Caner E., Güney B.A. Characterization of ceramic ware fragments from Aizanoi-Turkey by micro Raman, XRPD and SEM-EDX spectrometry. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2017, vol. 177, pp. 135–139.
36. Aseev V.A., Prokuratov D.S., Jolshin D.D., Mironov L.Yu., Bulygina N.A., Leonidova A.A., Ivanova T.I., Nikonorov N.V., Menu M.A. Ceramic floor tiles with yellow pigment from Kievan Rus': A technological study. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2024, vol. 53, 104385.

37. Germinario Ch., Cultrone G., De Bonis A., Izzo F., Langella A., Mercurio M., Nodari L., Vyhnał Ch.R., Grifa C. μ -Raman spectroscopy as a useful tool for improving knowledge of ancient ceramic manufacturing technologies. *Applied Clay Science*, 2024, vol. 25, 107347.
38. Winter A. *Die Antike Glanztonkeramik: Praktische Versuche*. Mainz am Rhein, Verlag Philipp Von Zabern, 1978.
39. Noble J.V. *The Techniques of Painted Attic Pottery*. London, Faber, 1988, 216 p.
40. *The Colors of Clay: Special Techniques in Athenian Vases*. Los Angeles, The J. Paul Getty Museum, 2006, 372 p.

Информация об авторах

Егорова Т.В. – кандидат исторических наук, преподаватель кафедры археологии исторического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова; научный сотрудник Отдела сохранения археологического наследия Института археологии РАН, Researcher ID: OGP-4750-2025, Scopus ID: 56527991300.

Смирнова В.С. – младший научный сотрудник группы ДН-12 Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований; младший научный сотрудник Отдела сохранения археологического наследия Института археологии РАН, Researcher ID: JPA-3284-2023, Scopus ID: 57212565721.

Зубавичус Е.Я. – аспирант Института археологии РАН, младший научный сотрудник лаборатории архитектурной археологии и междисциплинарного изучения архитектурных памятников Института археологии РАН, Researcher ID: JOJ-5924-2023, Scopus ID: 58164008300.

Бакиров Б.А. – младший научный сотрудник группы ДН-12 Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований; младший научный сотрудник Отдела сохранения археологического наследия Института археологии РАН, Researcher ID: ABE-3006-2021, Scopus ID: 57405760000.

Назаров К.М. – PhD, заведующий лабораторией нейтронной физики, Институт ядерной физики, Агентство Республики Казахстан по атомной энергии, Researcher ID: GPP-3408-2022, Scopus ID: 57218710021.

Кичанов С.Е. – доктор технических наук, начальник группы ДН-12 Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Researcher ID: ACY-5783-2022, Scopus ID: 7801632882.

Сапрыкина И.А. – кандидат исторических наук, старший научный сотрудник Отдела сохранения археологического наследия Института археологии РАН, Researcher ID: F-3875-2014, Scopus ID: 55513038300.

Authors information

Egorova T.V. – Candidate of Science (History), Lecturer at the Department of Archaeology, Faculty of History, Lomonosov Moscow State University; Research Fellow at the Department of Preservation of Archaeological Heritage, Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences, Researcher ID: OGP-4750-2025, Scopus ID: 56527991300.

Smirnova V.S. – Junior Researcher, DN-12 Group, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research; Junior Researcher, Department for Preservation of Archaeological Heritage, Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences, Researcher ID: JPA-3284-2023, Scopus ID: 57212565721.

Zubavichus E.Ya. – postgraduate, Junior Research Fellow, Laboratory of Architectural Archaeology and Interdisciplinary Research of Architectural Sites of the Institute of Archeology of RAS, Researcher ID: JOJ-5924-2023, Scopus ID: 58164008300.

Bakirov B.A. – Junior Researcher, DN-12 Group, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research; Junior Researcher, Department for Preservation of Archaeological Heritage, Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences, Researcher ID: ABE-3006-2021, Scopus ID: 57405760000

Nazarov K.M. – PhD, Head of Laboratory of Neutron Physics, Institute of Nuclear Physics, Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Researcher ID: GPP-3408-2022, Scopus ID: 57218710021.

Kichanov S. E. – Doctor of Science (Technical), Group Leader DN-12, Frank Laboratory of Neutron Physics, International Intergovernmental Organization Joint Institute for Nuclear Research, Researcher ID: ACY-5783-2022, Scopus ID: 7801632882.

Saprykina I.A. – Candidate of Science (History), Senior Researcher, Department of Archaeological Heritage Conservation of the Institute of Archeology of RAS, Researcher ID: F-3875-2014, Scopus ID: 55513038300.