
ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПЕРСТНЕЙ ИЗ НЕКРОПОЛЯ ЛУЧИСТОЕ-2

Анастасия Юрьевна Лобода

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия
lobodaau@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4926-1140>*

Анна Витальевна Антипенко

*Институт археологии Крыма РАН, Симферополь, Россия
an.antipenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8699-3132>*

Полина Викторовна Гурьева¹

Екатерина Сергеевна Коваленко²

Михаил Михайлович Мурашев³

Игорь Николаевич Трунькин⁴

Наталья Борисовна Шалявина⁵

Артем Маратович Исмагулов⁶

Елена Юрьевна Терещенко⁷

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Москва, Россия

¹ *poli.b3@gmail.com*

² *kovalenko_es@mail.ru*

³ *mihail.mmm@inbox.ru*

⁴ *igor.trunckin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-5036>*

⁵ *shaliavina.n@gmail.com*

⁶ *ismagulov.art@mail.ru*

⁷ *elenatereschenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5035-6978>*

Татьяна Николаевна Смекалова

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия
tmsmek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5378-5372>*

Екатерина Борисовна Яцишина

*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» Москва, Россия
yatsishina_eb@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7652-7253>*

Аннотация. Представлены исследования трех перстней с цветными вставками из могилы № 16 некрополя Лучистое-2. Уточнение конструктивных особенностей перстней выполнено методами рентгеновской и нейтронной томографии. Исследование элементного состава металла перстней и цветных вставок выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с лазерным пробоотбором. Материал деталей сложносоставного перстня дополнительно изучали методом растровой электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом. Все три перстня изготовлены из латуни. Цветные вставки изготовлены из стекла, состав которого характерен для римского стекла I–III вв. н.э. Детали сложносоставного перстня спаяны медно-свинцовым припоем, который плохо сохранился. Сочетание рентгеновской и нейтронной томографии позволило определить, что стеклянные вставки во всех трех перстнях удерживаются в кастах с помощью клея органического происхождения, также с помощью органического клея усилены разрушенные области пайки деталей оправы сложносоставного перстня.

Ключевые слова: Лучистое-2, перстни, рентгеновская томография, нейтронная томография, масс-спектрометрия индуктивно связанной плазмой с лазерным пробоотбором, растровая электронная микроскопия с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом

Благодарности: Исследования выполнены при финансовой поддержке Российской Федерацией в лице Минобрнауки России в рамках Соглашения о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий № 075-15-2023-010 от 21.02.2023 (15.СИН.21.0024).

A STUDY OF THE CONSTRUCTION OF FINGER-RINGS FROM THE CEMETERY OF LUCHISTOE-2

Anastasia Yu. Loboda

*National Research Center "Kurchatov Institute," Moscow, Russia
lobodaau@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4926-1140>*

Anna V. Antipenko

Institute of Archaeology of the Crimea of the Russian Academy of Sciences, Simferopol, Russia
an.antipenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8699-3132>

Polina V. Guryeva¹

Ekaterina S. Kovalenko²

Mikhail M. Murashev³

Igor N. Trunkin⁴

Natalya B. Shalyavina⁵

Artem M. Ismagulov⁶

Elena Yu. Tereschenko⁷

National Research Center "Kurchatov Institute," Moscow, Russia

¹ *poli.b3@gmail.com*

² *kovalenko_es@mail.ru*

³ *mihail.mmm@inbox.ru*

⁴ *igor.trunkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3470-5036>*

⁵ *shaliavina.n@gmail.com*

⁶ *ismagulov.art@mail.ru*

⁷ *elenatereschenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5035-6978>*

Tatiana N. Smekalova

V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia
tnsmek@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5378-5372>

Ekaterina B. Yatsishina

National Research Center "Kurchatov Institute" Moscow, Russia
yatsishina_eb@nrcki.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7652-7253>

Abstract. This article presents the research of three finger-rings with colored insets from grave no. 16 in the cemetery of Luchistoe-2. The clarification of the details of design of these finger-rings was made with X-ray and neutron tomography. The study of the elemental composition of the metal of the finger-rings and colored insets was made with inductively coupled plasma mass spectrometry with laser sampling. The material of the parts of the multipartite finger-ring was additionally studied by scanning electron microscopy in combination with energy-dispersive X-ray microanalysis. All the three finger-rings are made of brass. The colored insets are made of glass, which composition is characteristic of the Roman glass from the first to third century AD. The parts of the multipartite finger-ring are soldered with poorly preserved copper-lead alloy. The combination of X-ray and neutron tomography made it possible to determine that the glass insets in all the three rings are fixed in holders with glue of organic origin, and the destroyed soldering areas of the frame parts of the multipartite finger-ring were also reinforced with the organic glue.

Keywords: Luchistoe-2, finger-rings, X-ray tomography, neutron tomography, inductively coupled plasma mass spectrometry with laser sampling, scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray microanalysis

Acknowledgments: The research was carried out with the financial support of the Russian Federation through the Ministry of Science and Higher Education within the framework of the Federal Budget Grant Agreement no. 075-15-2023-010 dated 02.21.2023 (15.SIN.21.0024).

Некрополь римского времени Лучистое-2, предварительно датированный второй половиной I – первой половиной III в. н.э., расположен в центре южной части Горного Крыма, в северной части Алуштинского горно-приморского амфитеатра, в пределах с. Лучистое, на вершине холма Бияз-Таш. Он обнаружен в ходе археологических раскопок 2013 г., тогда же изучен один погребальный комплекс [12; 3; 17]. В 2015 г. Горно-Крымским отрядом Южно-Боспорской экспедиции Института археологии Крыма начаты охранные раскопки некрополя. Исследовано 11 погребальных комплексов и связанные с ними культурные слои с остатками тризн. В 2021 г. эти работы были продолжены. Изучено 6 погребальных комплексов. Три перстня, исследование которых представлено в данной работе, найдены при раскопках 2021 г. погребального комплекса 16 некрополя Лучистое-2.

Могила № 16 некрополя Лучистое-2 может быть датирована первой половиной II в. н.э. на основании находки миниатюрной фибулы с завитком на конце приемника, относящейся к группе 13, варианту 1 по А. К. Амброзу [1, с. 46] или группе 8, серии I по В. В. Кропотову [4, с. 183]. Время бытования этого варианта определяется I – началом II в. н.э. Вместе с ней была найдена лучковая подвижная фибула с четыреххвостковой пружиной с верхней тетивой группы 15, варианта 3 по А. К. Амброзу, датирующегося II в. н.э., вероятнее, его первой половиной [1, с. 49] или группы 4, серии I, варианта 3 по В. В. Кропотову [4, с. 74]. В этой же могиле обнаружено 5 перстней, три из которых стали объектом представленного исследования.

В данной работе изучался не только материал перстней со вставками из полупрозрачного стекла, но и их конструкция.

Объекты и методы

П1 (П.О. № 5), П2 (П.О. № 15). Перстни литые, с пластинчатыми расширяющимися с лицевой стороны шинками, кольцеобразными округло-овальными гнездами с шаросегментовидными вставками из полупрозрачного стекла светло-голубого цвета (рис. 1, а, б).

П3 (П.О. № 11). Перстень с пластинчатой шинкой и напаянным щитком. На концах шинки – овальные площадки, сведенные и спаянные внахлест. Щиток круглый, с округлым в сечении гнездом и шаросегментовидной вставкой из полупрозрачного темно-синего стекла (рис. 1, в).

Перстни П1 и П2 относятся к группе 2, типу 1.2 по А. А. Труфанову, которая датируется второй половиной I – первой половиной II в. н.э. Перстни такого типа были широко распространены в Северном Причерноморье, но особенно много находок зафиксировано в погребениях Юго-Западного и Центрального Крыма [13, с. 128–130].

Перстень П3 относится к группе 3, типу 2 по А. А. Труфанову. Такие изделия встречаются, в основном, в комплексах хронологического диапазона от последней четверти I до первой половины III в. н.э. [13, с. 137].

Уточнение конструктивных особенностей перстней выполнено методами рентгеновской (РТ) и нейтронной (НТ) томографии. Исследование элементного состава металла перстней и цветных вставок выполнялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с лазерным пробоотбором (МС-ИСП-ЛА). Уточнение состава деталей и областей их контакта в сложносоставном перстне П3 выполнялось методом растровой электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом (РЭМ/ЭРМ).

Визуализация внутреннего строения методом рентгеновской томографии выполнена на промышленном томографе X5000 (NSI). Теневые проекции регистрировались позиционно-чувствительным детектором рентгеновского излучения Perkin Elmer с размером матрицы 2048×2048 пикселей, размером пикселя 200×200 мкм, динамическим диапазоном 16 бит и сканителем на основе CsI:Tl. Томография проводилась на трубке открытого типа при размере фокального пятна 21–22 мкм. Применялся медный фильтр толщиной 1 мм. Параметры измерения объектов: напряжение 150–160 кВ, ток 140 мкА, время экспозиции одной проекции 1 с, усиление 0,5 пФ, размер вокселя изображений 10×10×10 мкм. Для визуализации трехмерной информации о строении объектов использовался программный пакет VGStudio.

Нейтронная томография объектов проводилась на экспериментальном стенде ПОНИ, расположенном на горизонтальном экспериментальном канале № 76 исследовательского реактора ИР-8. Применялся полихроматический спектр нейтронов с максимумом ~1 Å. Нейтронные проекции регистрировались позиционно-чувствительным детектором, состоящим из сканителевого экрана на основе смеси ZnS(Ag) и ⁶LiF толщиной 100 мкм, зеркала, объектива и ПЗС-матрицы размерностью 2048×2048 пикселей с динамическим диапазоном 16 бит. Время экспозиции одной теневой проекции составило 200 с для всех объектов. Шаг поворота объектов относительно вертикальной

оси – $0,5^\circ$. Размер вокселя полученных изображений – $65 \times 65 \times 65$ мкм. При обработке данных нейтронной томографии для корректировки изображений на фоновые шумы и нормализации на падающий пучок использовался программный пакет ImageJ [15]. Томографическая реконструкция трехмерных изображений из набора угловых проекций выполнялась методом свертки и обратной проекции с помощью программного пакета Ostopus Reconstruction 8.6 [16].

Исследование элементного состава металла перстней и вставок выполнялось методом МС-ИСП-ЛА. Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой выполнялась на установке Elan DRC-e (Perkin Elmer) с приставкой лазерной абляции NWR-213. Градуировку для измерения состава вставок проводили по твердому стандартному образцу NIST SRM 610 с нормированием на 100% суммы по оксидам, для измерения состава основных компонентов металла использовались ГСО 10588–2015 Зл4а-4 и ГСО 10283.

Конструктивные элементы перстня ПЗ были дополнительно исследованы методом растровой электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом (РЭМ/ЭРМ) с помощью растрового двухлучевого электронно-ионного микроскопа Helios Nanolab 600i (Thermo Fisher Scientific), оборудованного системой ЭРМ (EDAX), при ускоряющем напряжении 30 кВ в режиме высокого вакуума (10^{-4} Па). Обработка спектров ЭРМ осуществлялась с помощью программного обеспечения TEAM (EDAX). Суммарное содержание обнаруженных элементов приводилось к 100%. Чувствительность метода составляет 0,1–0,5 масс. %. Данные об основном составе изученных областей усреднялись по результатам 3–5 измерений.

Результаты и обсуждение

Визуализация конструкции перстней. Методами РТ и НТ установлено, что перстни П1 и П2 имеют схожую конструкцию. Шинки этих перстней имеют в сечении форму овала и расширяются в площадку с углублением для размещения вставки (рис. 2; табл. 1). Толщина площадки перстня П1 минимальна в центре (табл. 1), а у перстня П2 в центре площадки наблюдается сквозное отверстие диаметром около 1,1 мм (рис. 2,а), образовавшееся, вероятно, в результате утраты части металла из-за коррозии. Толщина шинок перстней П1 и П2 постепенно увеличивается к площадкам.

Конструкция перстня ПЗ состоит из шинки, а также оправы и каста, закрепленных на шинке. Шинка перстня ПЗ выполнена из полоски металла подпрямоугольного сечения (табл. 1), свернутой в кольцо с нахлестом около 2 мм. Область перекрытия концов полоски расположена под кастом (рис. 3,а,б,с) и образует площадку, толщина которой плавно уменьшается (табл. 1). Каст изготовлен из полоски металла, закрепленной на шинке и образующей углубление для вставки (табл. 1; рис. 3,5). Вокруг каста дополнительно закреплена оправа – кольцо из овальной в сечении проволоки (табл. 1; рис. 3,6). Концы проволоки незамкнуты, между ними наблюдается зазор около 1,5 мм. Области соединения концов каста и оправы расположены с противоположных сторон вставки (рис. 3,в,е). Между краями шинки, а также между кастом и оправой наблюдается вещество с большим (на $\sim 40\%$) поглощением рентгеновского излучения относительно металла шинки (рис. 3,7). Вероятно, первоначально металлические детали перстня были соединены при помощи пайки.

Согласно данным НТ во всех перстнях (П1 и П2 – между площадкой и вставкой, ПЗ – между кастом, оправой, площадкой и вставкой), помимо коррозии, наблюдается неравномерно распределенное вещество, обладающее достаточно однородной морфологией, ослабление нейтронного потока которым в ~ 2 раза превышает ослабление металлом шинок (рис. 2,б,4; 2,с,4; 3,с,8). Ослабление этим веществом рентгеновского излучения незначительно меньше по сравнению с ослаблением материалом вставок. Основываясь на значительном ослаблении этим веществом нейтронного потока и обратной картины для рентгеновского излучения, можно предположить

его органическое происхождение. Вероятно, вставки перстней были закреплены с помощью клея. Также с помощью клея были усилены разрушенные области пайки каста и оправы ПЗ.

Стеклянные вставки всех трех перстней имеют плоско-выпуклую форму (табл. 1) и в целом однородное внутреннее строение. Внутри вставок наблюдаются округлые полости: для П1 их размеры не превышают 130 мкм, для П2 – 200 мкм, для ПЗ – 800 мкм (рис. 3,2). Во вставке ПЗ, помимо полостей, выявляются единичные округлые включения диаметром до 200 мкм (рис. 3,3), ослабление которыми рентгеновского излучения на ~40% превышает ослабление металлом шинки и близко к ослаблению припоем. Эти включения неконтрастны в нейтронной томографии.

Элементный состав металла изделий. Методом МС-ИСП-ЛА было установлено (табл. 2), что все три изделия изготовлены из латуни. Единственный значимый легирующий компонент в сплаве помимо меди (Cu 82,3–91,5%) – цинк (Zn 10,2–19,5%). В сплаве всех трех изделий обнаружены микропримеси свинца, олова, железа, сурьмы, мышьяка, серебра, никеля и висмута. Металл всех трех перстней относится к одной категории сплавов, однако немного различается, как по содержанию основного компонента – цинка, так и по микропримесному составу. Кроме того, П1 и П2 отличаются присутствием микропримеси золота (табл. 2).

РФА исследования металла аналогичных находок, в том числе анализ перстней, найденных при раскопках могильника Лучистое-2 в 2013–2021 гг. [11] и других металлических предметов из могилы № 16 некрополя Лучистое-2 [5, с. 222–228] показали, что все они выполнены из латуни или латуни с незначительной примесью олова.

Конструктивные элементы сложносоставного перстня ПЗ были дополнительно исследованы методом РЭМ/ЭРМ (табл. 3). Все металлические детали – шинка, каст и оправа изготовлены из латуни, содержание цинка в которой от 18 до 21%. Отдельно была изучена зона между кастом и оправой со следами припоя по данным РТ (рис 3,8). Из-за плохой сохранности и коррозионных наслоений отделить состав припоя от металла основы было достаточно сложно, но установлено (табл. 3, припой 1), что он состоит преимущественно из меди и свинца, цинк в большинстве изученных областей отсутствует, примесь олова в сплаве достигает 2%. На некоторых участках измерение состава припоя было затруднено большим количеством фосфора – до 15% (табл. 3, припой 2), который, вероятно, связан с присутствием в этих областях клея, предположительно органического, обнаруженного при томографии.

Изучение аналогичных составных перстней из коллекции могильника Лучистое-2 показало, что их конструктивные элементы также соединяли с помощью свинцово-оловянного припоя [11].

Элементный состав материала вставок. МС-ИСП-ЛА было установлено, что в составе всех трех вставок преобладает кремний (70,5–77,2%), присутствует натрий (11,8–17,2%), кальций (6,3–7,2%) и алюминий (2,0–2,6%), что соответствует составу стекла. Содержание калия и магния не превышает 0,6% (0,4–0,6% и ~0,4%, соответственно). Выделяется вставка из перстня ПЗ, в ее составе присутствует меньше марганца, который считается основным обесцвечивателем стекла [2, с. 30] – в П1 и П2 0,8–0,9%, по сравнению с 0,3% в ПЗ. Также в ней присутствует примерно в 3 раза больше железа (в П1 и П2 0,3%, по сравнению с 0,9% в ПЗ) и в 10 раз больше меди (в П1 и П2 0,02%, по сравнению с 0,2% в ПЗ), что обуславливает синий оттенок вставки (рис. 1,6; табл. 4).

Согласно исследованиям О. С. Румянцевой [6; 7, с. 74], подобные составы характерны для стекол натриево-кальциево-кремнеземного типа ($\text{Na}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$) и соответствующего составу римского стекла I–III вв. н.э. Аналогичные по составу стекла были найдены в могильнике Фронтное 3 [7, с. 90], Скалистое III [8], Дружное, Нейзац и Опушки [14, с. 114]. Такое стекло, обнаруживаемое при раскопках на территории от римской Британии до левантийского побережья, имеет достаточно однородный химический состав.

Заключение

В результате проведенных исследований подтверждено, что каст двух перстней П1 и П2, относящихся по классификации А. А. Труфанова к группе 2, типу 1.2, отлит вместе с шинкой, но плохая сохранность шинки у обоих перстней не позволяет нам утверждать, что кольца были полностью цельнолитыми. Было установлено по комплементарным данным нейтронной и рентгеновской томографии, что стеклянная вставка удерживается в гнезде с помощью клея, вероятно, органического происхождения. Также впервые было показано, что с помощью клея были усилены разрушенные области пайки каста и оправы.

Были получены новые данные о сложной конструкции перстня ПЗ, который А. А. Труфанов относит к группе 3, типу 2 [13, с. 137], существенно дополняющие известные ранее сведения. Так, был выявлен дополнительный конструктивный элемент – оправа вокруг каста в виде кольца из овальной в сечении проволоки. Области соединения концов каста и оправы, вероятно, преднамеренно, для большей жесткости конструкции расположены с противоположных сторон вставки. Было также установлено, что все металлические детали перстня были соединены при помощи пайки: с помощью данных РТ и НТ установлено, что между кастом, оправой и площадкой практически по всему периметру каста наблюдается щель с фрагментами припоя. Конструктивная целостность перстня также поддерживается органическим клеем, присутствие которого обнаружено в областях пайки и под вставкой.

Было установлено, что все три перстня изготовлены из латуни. Детали перстня ПЗ (шинка, каст, оправа) выполнены из сплавов с небольшой вариацией содержания цинка и спаяны припоем, который плохо сохранился.

Тенденция использования латуни и мультикомпонентных сплавов с высоким содержанием цинка для изготовления украшений и деталей костюма распространяется в Крыму, начиная с I в. н.э., что удалось зафиксировать благодаря исследованию значительного количества предметов, происходящих из памятников Центрального и Юго-Западного Крыма [9; 11; 10, с. 641–642]. Предположительно, украшения из этого импортного материала пользовались популярностью среди варварского населения Крыма благодаря визуальному сходству с золотом [10, с. 641–642].

Таблица 1. Размеры элементов конструкции перстней
(Т – толщина, Ш – ширина, Д – диаметр, В – высота), мм

Table 1. Dimensions of the structural elements of the finger-rings
(Т – thickness, Ш – width, Д – diameter, В – height), mm

Образец	Особенность конструкции области вставки	Шинка	Площадка для вставки			Каст	Оправа
		Т×Ш	Т min	Ш max	Углубление	Т×Ш	Т×Ш
П1	цельнолитой	0,5–0,7×0,9–1,3	0,2	7,5	0,7	–	–
П2	цельнолитой	0,3–0,6×0,7–1,3	0	6,6	1,0	–	–
ПЗ	составной	0,3–0,7×2,3	0,3	11,0	–	0,3 × 1,6	0,8 × 1,1

Таблица 2. Состав металла перстней по данным МС-ИСП-ЛА, масс. %

Table 2. Metal composition of the rings according to ICP-LA MS data, mass. %

	Cu	Zn	Pb	Sn	Fe	Sb	As	Ag	Au	Ni	Bi	Mn	Se	Ti	Na	Mg	Al	K	Sr	Ba
П1	91,505	10,223	0,208	0,012	0,061	0,051	0,079	0,061	0,009	0,004	0,007	0,003	0,016	-	0,012	0,002	0,002	0,022	-	-
П2	82,276	19,525	0,423	0,163	0,079	0,166	0,057	0,033	0,001	0,015	0,004	-	0,002	-	-	-	-	0,012	-	-
П3	85,282	15,588	0,567	0,243	0,185	0,030	0,022	0,045	-	0,006	0,001	0,004	0,009	0,003	0,057	0,004	0,009	0,067	0,002	0,007

Таблица 3. Состав металла конструктивных элементов перстня П3 по данным РЭМ/ЭРМ, масс. %

Table 3. Metal composition of the structural elements of the P3 ring according to SEM/EDM data, mass. %

	Cu	Zn	Pb	Sn	Fe	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca
Шинка	75,3	20,5	-	-	0,4	0,2	1,3	1,7	-	0,2	0,2	-	0,2
Каст	76,7	21,0	-	0,3	0,2	0,2	0,4	0,7	0,1	0,1	0,2	-	-
Оправа	77,8	17,9	-	-	0,4	0,2	1,3	1,7	-	0,2	0,2	-	0,2
Припой 1	18,5	0,9	72,0	2,0	0,6	0,1	1,2	1,9	1,2	-	1,4	0,1	0,3
Припой 2	31,9	3,2	32,9	1,1	1,5	-	0,7	0,5	14,9	-	3,8	1,8	4,0

Таблица 4. Состав стеклянных вставок по данным МС-ИСП-ЛА, масс. %

Table 4. Composition of glass insets according to ICP-LA MS data, mass. %

	B ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	CoO
П1	0,047	11,796	0,374	2,023	77,200	0,142	0,442	6,288	0,059	0,004	0,001	0,948	0,260	0,002
П2	0,057	17,199	0,416	2,591	70,489	0,119	0,579	6,946	0,058	0,003	0,001	0,798	0,325	0,130
П3	0,048	16,411	0,450	2,070	70,681	0,155	0,553	7,205	0,066	0,002	0,002	0,349	0,903	-

	NiO	CuO	ZnO	Ga ₂ O ₃	As ₂ O ₃	RbO	SrO	ZrO ₂	Ag ₂ O	SnO	Sb ₂ O ₃	BaO	CeO	PbO
П1	0,002	0,021	0,020	0,001	-	-	0,055	0,005	0,001	-	0,001	0,029	0,001	0,002
П2	0,002	0,028	0,004	0,001	-	0,001	0,056	0,005	0,001	0,002	-	0,031	0,001	0,002
П3	0,004	0,211	0,010	0,001	0,004	-	0,049	0,006	-	0,003	0,305	0,024	0,001	0,013

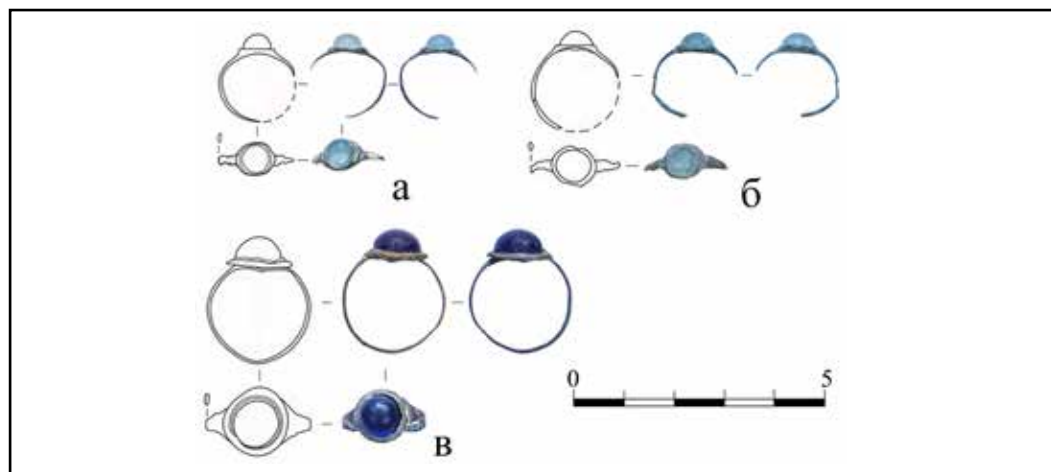


Рис. 1. Перстни из могильника Лучистое-2
a – объект П1 (П.О. № 5); *б* – объект П2 (П.О. № 15); *в* – объект П3 (П.О. № 11)

Fig. 1. Finger-rings from the cemetery of Luchistoye-2
a – object P1 (PO no. 5); *b* – object P2 (PO no. 15); *c* – object P3 (PO no. 11)

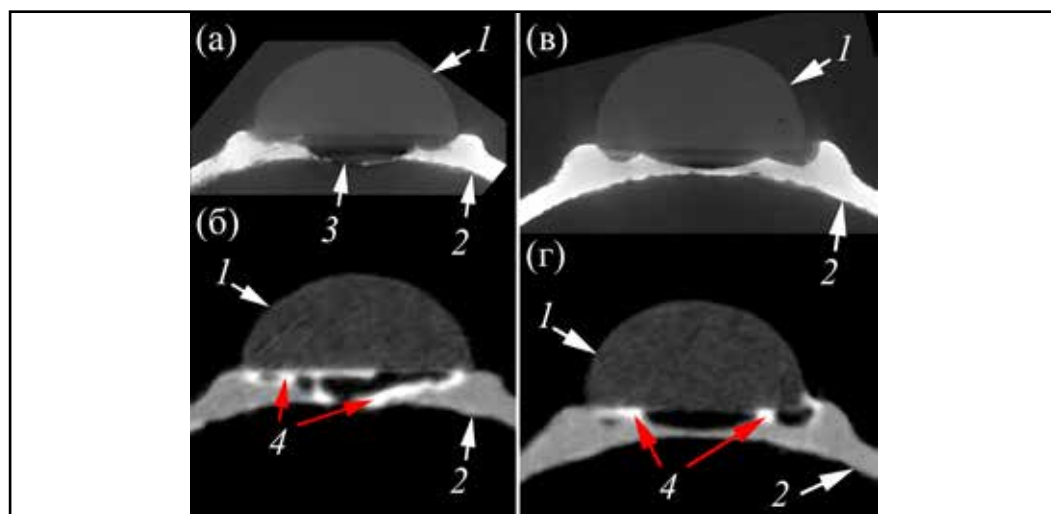


Рис. 2. Продольные томографические сечения перстня П1, проходящие через центр вставки, полученные с помощью рентгеновского излучения (а) и нейтронов (б).

Продольные томографические сечения перстня П2, проходящие через центр вставки, полученные с помощью рентгеновского излучения (в) и нейтронов (г)

1 – вставка, *2* – шинка, *3* – сквозное отверстие в центре площадки перстня П1, *4* – вещество, с помощью которого вставка закреплялась на шинке

Fig. 2. Longitudinal tomographic sections of finger-ring P1, passing through the center of the inset, obtained with X-rays (a) and neutrons (b). Longitudinal tomographic sections of finger-ring P2 passing through the center of the inset, obtained with X-rays (c) and neutrons (d)

1 – inset, *2* – shank, *3* – through hole in the center of the finger-ring panel P1, *4* – substance fixing the inset on the shank

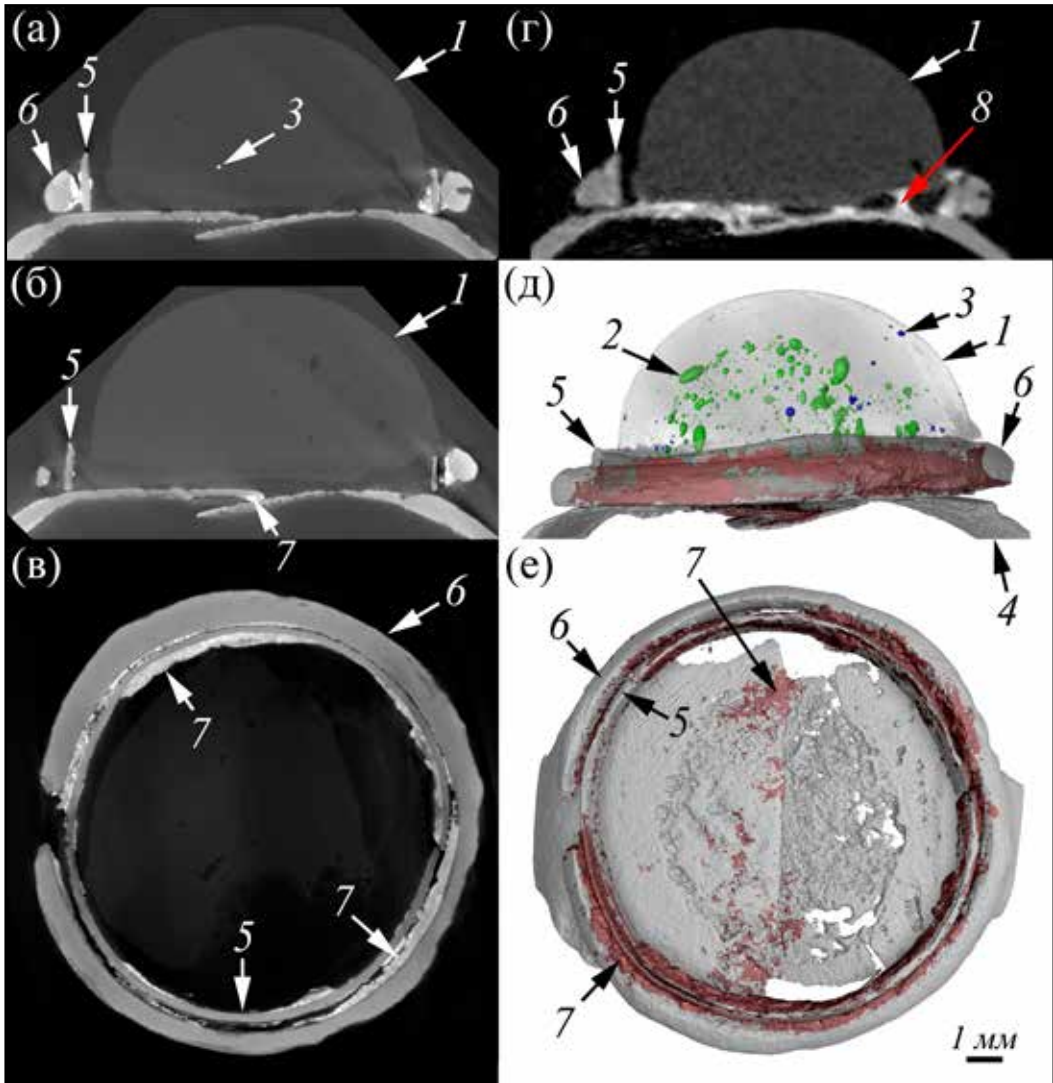


Рис. 3. Результаты томографии перстня ПЗ: продольные томографические сечения, проходящие вблизи центра вставки, полученные с помощью рентгеновского излучения (а, б) и нейтронов (г); поперечное томографическое сечение, проходящее через каст и крепежное кольцо, полученное с помощью рентгеновского излучения (в); модели поверхности перстня (д, е)
 1 – вставка, 2 – полости внутри вставки, 3 – включения внутри вставки,
 4 – шинка, 5 – каст, 6 – крепежное кольцо вокруг каста, 7 – вещество, с помощью которого скреплялись металлические детали перстня,
 8 – вещество, с помощью которого вставка закреплялась на шинке

Fig. 3. Tomography results of finger-ring P3: longitudinal tomographic sections passing near the center of the inset, obtained with X-rays (a, b) and neutrons (d); tomographic cross-section through the cast and fastening ring obtained with X-ray radiation (c); models of the surface of the ring (e, f)
 1 – insert, 2 – cavities inside the insert, 3 – inclusions inside the insert, 4 – shank, 5 – bridge, 6 – fastening ring around the caste, 7 – substance fixing the metal parts of the finger-ring, 8 – substance fixing the inset on the shank

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амброз А.К. Фибулы юга европейской части СССР. М.: Наука, 1966. 142 с.
2. Галибин В.А. Состав стекла как исторический источник. СПб.: Петербургское Востоковедение, 2001. 216 с. (Труды ИИМК РАН. Т. IV).
3. Лысенко А.В., Масыкин В.В., Мордвинцева В.И. Могила № 1 некрополя римского времени Лучистое-2 (Южный Крым) // История и археология Крыма. 2015. Вып. II. С. 295–333, 620–628.
4. Кропотов В.В. Фибулы сарматской эпохи. Киев.: АДЕФ Украина, 2010. 384 с.
5. Лысенко А.В., Деваев А.С., Мордвинцева В.И., Антипенко А.В., Смекалова Т.Н. Рентгено-флуоресцентный анализ состава сплава металлических предметов из раскопок некрополя Лучистое-2 в 2021 году // XXIII Боспорские чтения. Боспор Киммерийский и варварский мир в период античности и средневековья. Сакральное и материальное / Отв. ред. В.Н. Зинько. Симферополь, Керчь, 2022. С. 222–229.
6. Румянцева О.С. Стекло I тыс. н.э.: происхождение и распространение по данным химического состава и изотопного анализа // КСИА. 2015. Вып. 237. С. 20–49.
7. Румянцева О.С. Стекло могильника Фронтное 3 в юго-западном Крыму: хронология, динамика распространения и производственные центры (по данным химического состава) // МАИЭТ. 2022. Вып. XXVII. С. 72–116.
8. Румянцева О.С., Трифионов А.А. Питьевой рог и шпоры из погребения 28 могильника Скалистое III в Юго-Западном Крыму: состав стекла и эмали и данные о происхождении // История и археология Крыма. 2021. Вып. XIV. С. 57–70.
9. Сапрыкина И.А., Кичанов С.Е., Бакиров Б.А., Руткаускас А.В. Исследования химического состава металла монет и перстней из могильника Фронтное 3 методами нейтронной структурной диагностики // КСИА. 2022. Вып. 268. С. 100–112.
10. Смекалова Т.Н., Антипенко А.В., Лысенко А.В., Мордвинцева В.И., Деваев А.С., Леонов Л.Л., Гаврилюк А.Н., Жильцов Г.С. Феномен использования латуни для изготовления украшений в среде варварского населения Таврики римского времени // Российские нанотехнологии. 2022. Т. 17, № 5. С. 636–646. DOI: 10.56304/S1992722322050168.
11. Смекалова Т.Н., Лысенко А.В., Антипенко А.В. Состав сплава и технология изготовления перстней из раскопок некрополя Лучистое-2 в южной части горного Крыма: рентгено-флуоресцентный анализ // ПИФК. 2024. В печати
12. Тесленко И.Б., Лысенко А.В., Масыкин В.В. Новый могильник римского времени в центре Южной части Горного Крыма // Археологічні дослідження в Україні 2013 р. Київ: Інститут археології НАН України, 2014. С. 84–85.
13. Труфанов А.А. Металлические перстни из варварских погребений Крыма II в. до н.э. – IV в. н.э. // История и археология Крыма. 2022. Вып. XVI. С. 121–197.
14. Храпунов И.Н., Стоянова А.А., Лубкова Т.Н., Шабанов С.Б. Результаты исследования химического состава стеклянных сосудов из могильников предгорного Крыма римского времени // Археология, этнография и антропология Евразии. 2022. Т. 50, № 1. С. 106–115. DOI: 10.17746/1563-0110.2022.50.1.106-115.
15. Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis // Nature Methods. 2012. Vol. 9. No. 7. P. 671–675. DOI: 10.1038/nmeth.2089.
16. Dierick M., Masschaele B., Van Hoorebeke L. Octopus, a fast and user-friendly tomographic reconstruction package developed in LabView // Measurement Science and Technology. 2004. Vol. 15. No. 7. P. 1366. DOI: 10.1088/0957-0233/15/7/020.
17. Mordvintseva V.I., Lysenko A.V., Masyakin V.V. Female elite grave in the necropolis Luchistoe-2 (Southern Crimea) // Ancient Civilizations from Scythia to Siberia. 2016. Vol. 22. P. 199–261.

REFERENCES

1. Ambroz A.K. *Fibuly iuga evropeiskoi chasti SSSR* [Fibulae of the south of the European part of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 142 p.
2. Galibin V.A. *Sostav stekla kak istoricheskii istochnik* [The composition of glass as a historical source]. St. Petersburg, Peterburgskoe Vostokovedenie Publ., 2001, 216 p. (Proceedings of IHMC RAS. Vol. 4).

3. Lysenko A.V., Masyakin V.V., Mordvinceva V.I. Grave 1 of the necropolis Luchistoe-2 of the Roman period (the Southern Crimea). *Istoriia i arkhologiiia Kryma* [History and archeology of Crimea], 2015, vol. 2, pp. 295–333, 620–628.
4. Kropotov V.V. *Fibuly sarmatskoi epokhi* [Fibulae of the Sarmatian era]. Kiev, ADEF Ukraina Publ., 2010, 384 p.
5. Lysenko A.V., Devaev A.S., Mordvinceva V.I., Antipenko A.V., Smekalova T.N. X-ray fluorescence analysis of the composition of the alloy of metal objects from the excavations of the necropolis Luchistoye-2 in 2021. V.N. Zin'ko (ed.), *XXIII Bosporskie chteniia. Bospor Kimmeriiskii i varvarkii mir v period antichnosti i srednevekov'ia. Sakral'noe i material'noe* [23rd Bosporan Readings. Cimmerian Bosporus and the World of Barbarians in Antiquity and the Middle Ages. Sacred and material], Simferopol, Kerch, 2022, pp. 222–229.
6. Rumyantseva O.S. Glass in the I millennium AD: composition, origin and distribution. *Kratkie soobshcheniia Instituta arkhologii* [Brief Communications of the Institute of Archaeology], 2015, vol. 237, pp. 20–49.
7. Rumyantseva O.S. Glass from the Cemetery of Frontovoe 3 in the South-Western Crimea: The Chronology, Distribution Dynamics, and Production Centres (According to the Chemical Composition). *Materialy po arkhologii, istorii i etnografii Tavrii* [Materials in Archaeology, History and Ethnography of Tauria], 2022, vol. 27, pp. 72–116.
8. Rumyantseva O.S., Trifonov A.A. A drinking horn and spurs from grave 28 from the cemetery of Skalistoe 3 in the South-Western Crimea: the composition of glass and enamel and the origin data. *Istoriia i arkhologiiia Kryma* [History and archeology of Crimea], 2021, vol. 14, pp. 57–70.
9. Saprykina I. A., Kichanov S. E., Bakirov B. A., Rutkauskas A. V. The chemical composition analysis of the metal of the coins and rings from Frontovoye 3 using the methods of neutron structural diagnostics. *Kratkie soobshcheniia Instituta arkhologii* [Brief Communications of the Institute of Archaeology], 2022, vol. 268, pp. 100–112.
10. Smekalova T.N., Antipenko A.V., Lysenko A.V., Mordvinceva V.I., Devaev A.S., Leonov L.L., Gavrilyuk A.N., Zhil'cov G.S. Phenomenon of the Use of Brass for the Manufacture of Jewelry among the Barbarian Population of Taurica in Roman Times. *Nanotechnologies in Russia*, 2022, vol. 17, iss. 5, pp. 644–654. DOI: 10.1134/S2635167622050160.
11. Smekalova T.N., Lysenko A.V., Antipenko A.V. Composition of the alloy and technology for making rings from the excavations of the necropolis Luchistoye-2 in the southern part of the mountainous Crimea: X-ray fluorescence analysis. *Problemy istorii, filologii, kul'tury* [Problems of History, Philology and Culture], 2024, in print.
12. Teslenko I.B., Lysenko A.V., Masyakin V.V. New burial ground of Roman times in the center of the southern part of the Crimean Mountains. *Arkheologichni doslidzhennia v Ukraini 2013 r.* [Archaeological research in Ukraine 2013], Kiev, Institute of Archeology of NAS of Ukraine Publ., 2014, pp. 84–85.
13. Trufanov A.A. Metal rings from the barbarian burials of the Crimea of the 2nd century BC – 4th century AD. *Istoriia i arkhologiiia Kryma* [History and archeology of Crimea], 2022, vol. 16, pp. 121–197.
14. Khrapunov I.N., Stoyanova A.A., Lubkova T.N., Shabanov S.B. The Chemical Analysis of Glass Samples from Roman Era Cemeteries in the Crimean Piedmont. *Arkheologiia, etnografiia i antropologiia Evrazii* [Archaeology, Ethnology & Anthropology of Eurasia], 2022, vol. 50, no. 1, pp. 106–115. DOI: 10.17746/1563-0110.2022.50.1.106-115.
15. Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 2012, vol. 9, no. 7, pp. 671–675. DOI: 10.1038/nmeth.2089.
16. Dierick M., Masschaele B., Van Hoorebeke L. Octopus, a fast and user-friendly tomographic reconstruction package developed in LabView. *Measurement Science and Technology*, 2004, vol. 15, no. 7, p. 1366. DOI: 10.1088/0957-0233/15/7/020.
17. Mordvintseva V.I., Lysenko A.V., Masyakin V.V. Female elite grave in the necropolis Luchistoe-2 (Southern Crimea). *Ancient Civilizations from Scythia to Siberia*, 2016, vol. 22, pp. 199–261.

Информация об авторах

Лобода А. Ю. – научный сотрудник лаборатории естественнонаучных методов в гуманитарных науках НИЦ «Курчатовский институт», Researcher ID: U-4725-2017.

Антипенко А. В. – младший научный сотрудник отдела реализации грантов Института археологии Крыма РАН, Researcher ID: U-2937-2019.

Гурьева П. В. – инженер-исследователь НИЦ «Курчатовский институт».

Коваленко Е. С. – научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт».

Мурашев М. М. – лаборант-исследователь НИЦ «Курчатовский институт».

Трунькин И. Н. – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Ресурсного центра зондовой электронной микроскопии НИЦ «Курчатовский институт».

Шалявина Н. Б. – специалист лаборатории естественнонаучных методов в гуманитарных науках НИЦ «Курчатовский институт».

Исмагулов А. М. – младший научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт».

Терещенко Е. Ю. – кандидат физико-математических наук, и.о. начальника лаборатории естественно-научных методов в гуманитарных науках НИЦ «Курчатовский институт», Researcher ID: A-8731-2014.

Смекалова Т. Н. – доктор исторических наук, заведующий отделом естественно-научных методов в археологии НИЦ истории и археологии Крыма Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, Researcher ID: R-3665-2016.

Яцишина Е. Б. – доктор исторических наук, заместитель директора по научной работе НИЦ «Курчатовский институт», Researcher ID: AAX-1228-2020.

Authors information

Loboda A. Yu. – Researcher of the Laboratory of natural science methods in the humanities of the National Research Center “Kurchatov Institute”, Researcher ID: U-4725-2017.

Antipenko A. V. – Junior Researcher of the Grants Implementation Department of the Institute of Archaeology of the Crimea of RAS, Researcher ID: U-2937-2019.

Guryeva P. V. – Research Engineer at the National Research Center “Kurchatov Institute”.

Kovalenko E. S. – Research at the National Research Center “Kurchatov Institute”.

Murashev M. M. – Research assistant at the National Research Center “Kurchatov Institute”.

Trunkin I. N. – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Researcher at the Resource Center for Probe Electron Microscopy of the National Research Center “Kurchatov Institute”.

Shalyavina N. B. – Specialist of the Laboratory of natural science methods in the humanities of the National Research Center “Kurchatov Institute”.

Ismagulov A. M. – Junior Researcher at the National Research Center “Kurchatov Institute”.

Tereschenko E. Yu. – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Acting Head of the Laboratory of Natural Scientific Methods in the Humanities of the National Research Center “Kurchatov Institute”, Researcher ID: A-8731-2014.

Smekalova T. N. – Doctor of Science (History), Head of the Department of natural science methods in archaeology at the History and Archaeology of the Crimea Research Centre of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Researcher ID: R-3665-2016.

Yatsishina E. B. – Doctor of Science (History), Deputy Director for Research at the National Research Center “Kurchatov Institute”, Researcher ID: AAX-1228-2020.