

MISCELLANEA

Научная статья
УДК 539.1.06
doi: 10.17223/2312461X/42/11

Исследование древнерусских крестов с городища Дубна и его окрестностей методами рентгенофлуоресцентного анализа, нейтронной дифракции и томографии

Вероника Сергеевна Смирнова¹
Фёдор Николаевич Петров²
Лариса Владимировна Пантелеева^{3, 4}
Булат Айратович Бакиров^{5, 6}
Сергей Евгеньевич Кичанов⁷
Денис Петрович Козленко⁸
Ирина Анатольевна Сапрыкина⁹
Михаил Михайлович Мурашев¹⁰

^{1, 5, 7, 8} Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

³ Музей Дубны, Дубна, Россия

⁴ Московский областной общественный фонд историко-культурных исследований и гуманитарных инициатив «Наследие», Дубна, Россия

⁶ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

⁹ Институт археологии РАН, Москва, Россия

¹⁰ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

¹ veronicasm@jinr.ru

² steppe_exp@mail.ru

^{3, 4} lori68@list.ru

^{5, 6} Bulatbakirov4795@gmail.com

⁷ ekich@nf.jinr.ru

⁸ denk@nf.jinr.ru

⁹ dolmen200@mail.ru

¹⁰ mihaail.mmm@inbox.ru

Аннотация. Методом рентгенофлуоресцентного анализа исследован элементный состав серии древнерусских бронзовых крестов: тельников и энколпионов XII–XIII вв., найденных в ходе изучения древнерусского городища, расположенного в черте города Дубны Московской области, и его окрестностей. Неразрушающими структурными методами нейтронной дифракции и нейтронной томографии проанализирован фазовый состав и пространственное распределение химических компонентов в этих археологических объектах. Установлено, что материал большинства крестов представляет собой бронзу с низким содержанием олова ниже 5%. Объемные содержания меди и олова в материале исследуемых

крестов и фазовый состав коррозии получены из данных нейтронной дифракции. Обнаружено высокое содержание свинца в нескольких исследуемых крестах, что может быть связано с составом декоративной эмали на поверхности крестов. Восстановленные из данных нейтронной томографии трехмерные модели позволили не только исследовать пространственное распределение коррозионных фаз на поверхности и в объеме крестов, но и получить информацию о конструкционных особенностях исследуемых археологических объектов, выявить фрагменты внутреннего содержания крестов-энколпионов.

Ключевые слова: кресты, бронза, РФА, нейтронная дифракция, нейтронная томография

Для цитирования: Смирнова В.С., Петров Ф.Н., Пантелеева Л.В., Бакиров Б.А., Кичанов С.Е., Козленко Д.П., Сапрыкина И.А., Мурашев М.М. Исследование древнерусских крестов с городища Дубна и его окрестностей методами рентгенофлуоресцентного анализа, нейтронной дифракции и томографии // Сибирские исторические исследования. 2023. № 4. С. 201–219. doi: 10.17223/2312461X/42/11

Original article

doi: 10.17223/2312461X/42/11

The Study of Ancient Russian Crosses from The Settlement of Dubna and Surrounding Area Using XRF Analysis, Neutron Diffraction and Tomography

Veronika S. Smirnova¹, Fedor N. Petrov²,
Larisa V. Panteleeva^{3, 4}, Bulat A. Bakirov^{5, 6},
Sergey E. Kichanov⁷, Denis P. Kozlenko⁸,
Irina A. Saprykina⁹, Mikhail M. Murashev¹⁰

^{1, 5, 7, 8} Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation

³ Museum of Dubna, Dubna, Russian Federation

⁴ Nasledie Regional Public Foundation for Historical and Cultural Research and Humanitarian Initiatives, Dubna, Russian Federation

⁶ Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

⁹ Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

¹⁰ National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation

¹ veronicasm@jinr.ru

² steppe_exp@mail.ru

^{3, 4} lori68@list.ru

^{5, 6} Bulatbakirov4795@gmail.com

⁷ ekich@nf.jinr.ru

⁸ denk@nf.jinr.ru

⁹ dolmen200@mail.ru

¹⁰ mihail.mmm@inbox.ru

Abstract. The elemental composition of a series of ancient Russian bronze crosses: underwear ones and encolpions of the 12th – 13th centuries, which were found during the study of the ancient Russian settlement located within Dubna city, Moscow Region, and its suburb, was studied using X-ray fluorescence analysis. Non-destructive

structural methods of neutron diffraction and neutron tomography analyzed the phase composition and spatial distribution of chemical components in the studied archaeological objects. It has been established that the material of most crosses is a bronze with low tin content below 5%. The volumetric contents of copper and tin in the material of the studied crosses, and the phase composition of corrosion were obtained from neutron diffraction data. A high lead content was found in several of the studied crosses, which may be due to the composition of the decorative draw patterns on the surface of the crosses. Three-dimensional models were reconstructed from neutron tomography data made it possible not only to study the spatial distribution of corrosive phases on the surface and in the volume of the crosses, but also to obtain information about the structural features of the studied archaeological objects, to reveal fragments of the internal content of encolpion crosses.

Keywords: crosses, bronze, XRF, neutron diffraction, neutron tomography

For citation: Smirnova, V.S., Petrov, F.N., Panteleeva, L.V., Bakirov, B.A., Kichanov, S.E., Kozlenko, D.P., Saprykina, I.A. & Murashev, M.M. (2023) The Study of Ancient Russian Crosses from The Settlement of Dubna and Surrounding Area Using XRF Analysis, Neutron Diffraction and Tomography. *Sibirskie Istoricheskie Issledovaniia – Siberian Historical Research*. 4. pp. 201–219 (In Russian). doi: 10.17223/2312461X/42/11

Введение

Среди богатого материала, получаемого в ходе археологических раскопок древнерусских поселений, металлические кресты-тельники и кресты-энколпионы представляют собой не только ценнейшие культурно-исторические находки, но и удобные модельные объекты для детального исследования уровня развития производства и географического распространения предметов христианского культа, отражающих материальную и духовную культуру населения. Металлические кресты, как яркие представители христианских атрибутов, в большинстве случаев являются одними из наиболее сохранившихся объектов предметов личного благочестия (Колпакова 2007). Именно по форме крестов, фрагментам изображений, составу и типу поверхностного покрытия отслеживают места изготовления и ареалы распространения этих материальных представителей христианского культа (Недошивина 1995).

На основе сравнения формы крестов и изображений существуют различные вариации в классификации тельных крестов Древней Руси XI–XIII вв. Так, по форме выделяют кресты прямоконечной формы, мальтийского типа и криновидные. Самая обширная группа – это кресты с классификацией по типу орнамента: скандинавские, византийские или древнерусские. Интересно отметить, что многочисленную группу среди крестов составляют так называемые крестовидные привески. Они содержат в своей форме элементы христианского креста и языческого амулета одновременно (Недошивина 1995; Балдуев 2021). Особое место среди древнерусских крестов занимают энколпионы. Крест-энколпион представляет собой двустворчатый ковчежец-реликварий, хранящий в себе

вложение сакрального значения (Балдуев 2021). На обеих створках энколпионов, как правило, помещались христианские изображения: Распятие, фигура Богородицы или святых, крест. Сложные изображения формировались при отливке или наносились гравировкой с последующим декорированием каким-либо способом, например внедрением или пресованием заранее нарезанных полосок или просто заливкой расплавов, в частности черни (Колобылина и др. 2017).

Другой подход к классификации крестов XI–XIII вв. имеет естественно-научное основание и осуществляется по материалу, из которого изготовлены кресты. Выделяют медные, золотые, серебряные, каменные, эмалевые кресты. И с этой точки зрения в последнее время все больше внимания уделяется именно естественнонаучным методам исследования, которые позволяют получить информацию, недоступную традиционными экспериментальными подходами. В исследованиях металлических археологических объектов особое место занимают методы нейтронной структурной диагностики (Абрамзон и др. 2018; Saprykina, Kichanov, Kozlenko 2019; Podurets et al. 2021). Все нейтронные методы характеризуются глубоким проникновением в толщу исследуемого материала по сравнению с комплементарными рентгеновскими методами (Kichanov et al. 2018; Koval et al. 2020a, 2020b; Podurets et al. 2021). Так, метод нейтронной томографии уже зарекомендовал себя в исследованиях древнерусских украшений из Тверского клада 2014 г. (Сапрыкина и др. 2018), медных и серебряных монет (Sedyshev et al. 2020; Bakirov et al. 2021), фрагментов бронзового оружия (Mednikova et al. 2020). Также нейтронными методами детально исследовался крест-энколпион (Колобылина и др. 2017) из находок Суздальской экспедиции Института археологии РАН.

В Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Московская область) успешно реализуется научное направление по изучению археологических объектов неразрушающими методами структурной диагностики (Kardjilov, Festa 2016; Podurets et al. 2021) нейтронной томографией и дифракцией. Недавно проведены комплексные исследования бронзового зооморфного навершия (Смирнова и др. 2022), относящегося к ананьинской культурно-исторической области I тыс. до н.э. На основе полученных структурных данных высказаны предположения о технологических особенностях процессов бронзового литья и металлообработки бронзовых изделий, а также выявлены пути распространения коррозии в подобных металлических археологических объектах.

В нашей работе представлены результаты структурных нейтронных исследований методами нейтронной томографии и дифракции коллекции бронзовых крестов-тельников и энколпионов, найденных в ходе археологических исследований городища Дубна и его ближайших окрестностях – на территории деревни Прислон Тверской области. Полученные

структурные данные дополняются результатами рентгенофлуоресцентного анализа (РФА).

Объекты исследования

Шесть образцов крестов-тельников и крестов-энколпионов были получены из фондов Музея Дубны (г. Дубна, Московская область). Фотографии крестов представлены на рис. 1. Пять из шести объектов получены в ходе археологических исследований древнерусского городища Дубна специалистами Музея Дубны совместно с Московским областным общественным фондом историко-краеведческих исследований и гуманитарных инициатив «Наследие» (Петров, Зинин 2013; Петров, Пантелеева 2015). Один из крестов обнаружен в двух километрах от городища, на территории деревни Прислон в Тверской области. Городище Дубна расположено на правом берегу Волги, в устье реки Дубны, по ее левому берегу, к северу от Храма Похвалы Пресвятой Богородицы, в окрестностях улицы Ратмино современной Дубны. Все образцы крестов датируются последними веками домонгольского периода – XII–XIII вв. н.э.

Крест-энколпион представляет собой две отдельные створки с мелкими рельефными изображениями (образцы № 1645/1 и 1645/2). Он был найден при изучении городища Дубна в 2009 г. у края вскрытого большим шурфом участка рва. Каждая створка креста имеет рельефную пятичастную композицию с центральным изображением в рост и четырьмя поясными изображениями в медальонах. В центре лицевой створки креста-энколпиона находится изображение Распятия Христова, по сторонам – предстоящие изображения Богоматери и Иоанна Богослова, в верхнем и нижнем медальонах – изображения святителей Николая Чудотворца и Григория Богослова. В центре оборотной створки энколпиона изображена Богоматерь Ассунта, «Вознесенная». В медальонах по ее сторонам расположены изображения святых Козьмы, Демьяна, Петра и Василия. На створках энколпиона находятся зеркальные славянские надписи и обращение «Святая Богородица помогай» (рис. 1). Снаружи створки покрыты патиной; на левом медальоне оборотной створки отчетливо видны следы деформации восковой модели, по которой был отлит энколпион. Размер каждой створки 8,5×5,7 см.

Два нательных криновидных креста имеют простое средокрестие и трехлопастные концы, поверхность покрыта окислами, металл довольно сильно корродирован, возможно, был обожжен; эмаль в выемках не сохранилась. Образец 1629 был найден в 2013 г. в ходе изучения городища Дубна в заполнении жилища. Размер креста: 4,0×3,2 см. Второй криновидный крест (образец № 1432) является случайной находкой на берегу реки Волга в размывах культурного слоя городища Дубна. Размер: 3,7×3,0 см. Оба креста относятся к типу крестов с выемчатой эмалью

«киевского» типа, который является одним из наиболее часто встречающихся типов крестов-тельников домонгольского времени (Кайль, Нечитайло 2006: 188).

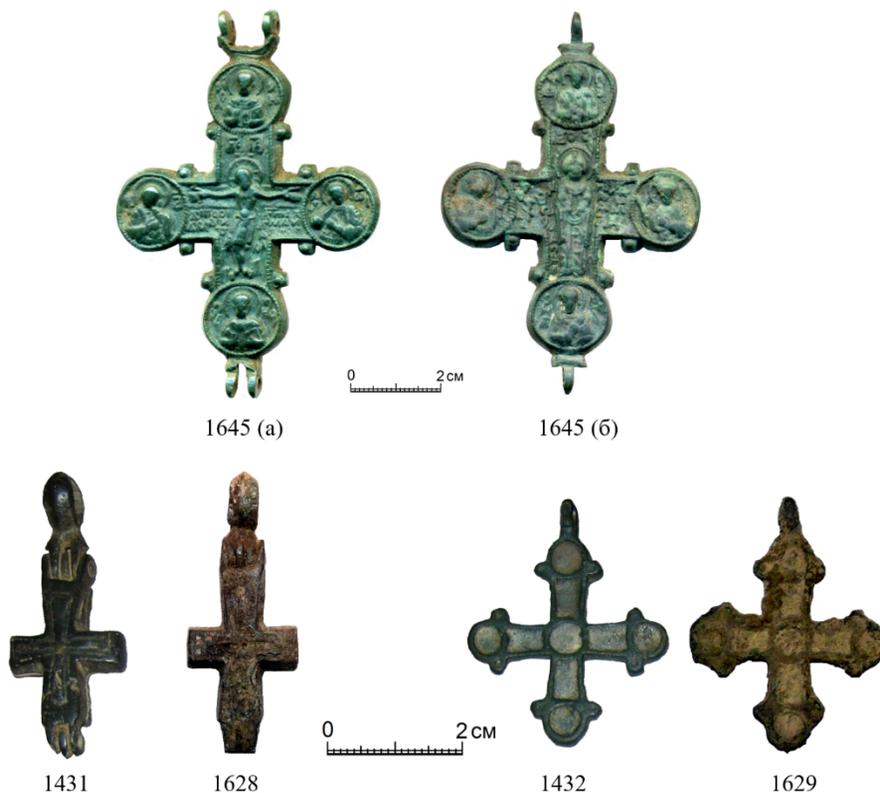


Рис. 1. Фотографии коллекции исследуемых образцов крестов-энколпионов и тельников. Представлены инвентарные номера археологических находок в каталоге Музея Дубны. Приведены размерные масштабные шкалы

Также в число исследуемых образцов входят два прямоконечных креста-энколпиона, на лицевых и оборотных створках которых присутствуют черневые изображения четырехконечного креста, по краям выполнены насечки, створки плотно закрыты. Образец № 1628 был обнаружен в 2013 г. в ходе исследований городища Дубна в заполнении жилища; поверхность креста покрыта окислами, металл довольно сильно корродирован, возможно, был обожжен. Размеры: 4,1×1,6 см. Другой образец № 1431 – прямоконечный энколпион, найденный на территории деревни Прислон Кимрского района Тверской области; покрыт слоем коррозии. Размеры: 4,2×1,7 см.

Описание эксперимента

Метод нейтронной дифракции

Исследования фазового состава четырех находок (№ 1431, 1432, 1628, 1629) проводились с помощью метода нейтронной дифракции на специализированном дифрактометре ДН-6 на высокопоточном реакторе ИБР-2 (ЛНФ, ОИЯИ). Были получены дифракционные спектры, которые измеряли при углах рассеяния $2\theta = 90^\circ$. Для данных углов рассеяния разрешение дифрактометра на длине волны $\lambda = 2 \text{ \AA}$ составляло $\Delta d/d = 0,025$. Характерное время измерения одного спектра – 10 минут. Фазовый состав образцов № 1645/1 и 1645/2 был исследован на станции нейтронной порошковой дифракции ДИСК (Glazkov et al. 1988) на шестом горизонтальном экспериментальном канале реактора ИР-8 (НИЦ «Курчатовский институт»). Анализ дифракционных данных производился методом Ритвельда с помощью программы FullProf (Rodriguez-Carvajal 1993).

Метод нейтронной томографии

Эксперимент по нейтронной томографии был проведен на специализированной экспериментальной станции для нейтронной томографии и радиографии (Kozlenko et al. 2016; Podurets et al. 2021) на 14-м канале импульсного реактора ИБР-2. В методе нейтронной томографии из набора отдельных радиографических проекций, полученных при различных угловых положениях образца относительно направления нейтронного пучка, выполняется объемная реконструкция внутреннего строения исследуемого объекта. Полученная трехмерная модель представляет собой массив данных из трехмерных вокселей (Kardjilov, Festa 2016), которые характеризуют степень или коэффициент ослабления нейтронного пучка в определенной точке исследуемого образца. Размер одного вокселя в нейтронном радиографическом эксперименте – $52 \times 52 \times 52$ мкм. В радиографическом эксперименте конвертация нейтронов в видимый свет, регистрируемый CCD видеокамерой, происходит с помощью пластины сцинтиллятора ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ толщиной 0,1 мм производства фирмы RCTRITEC Ltd (Швейцария). Проведение томографических экспериментов обеспечивает система гониометров HUBER с минимальным углом поворота до $0,02^\circ$. Полученные нейтронные данные корректируются на фоновые шумы детекторной системы и нормализуются на падающий нейтронный пучок с помощью программного пакета ImageJ (Schneider, Rasband, Eliseiri 2012). Томографическая реконструкция из набора угловых проекций исследуемых объектов осуществлялась программой SYRMEP Tomo Project (Brun 2017). Для визуализации и анализа получаемых трехмерных данных использовался программный комплекс VGStudio MAX 2.2 фирмы Volume Graphics (Германия).

Метод рентгенофлуоресцентного анализа

Исследования элементного состава проводились при помощи спектрометра Bruker M1 Mistral методом безэталоного РФА. Время измерения составило 60 с, напряжение – 50 кВ. Данный тип спектрометра позволяет проводить измерения поверхности на глубину до 10 мкм, а также выполнять анализ на наличие покрытий (Сапрыкина, Гунчина 2017).

Результаты

Нейтронная дифракция

Характерные нейтронные дифракционные спектры для бронзовых крестов № 1431, 1628, 1432 и 1629 представлены на рис. 2.

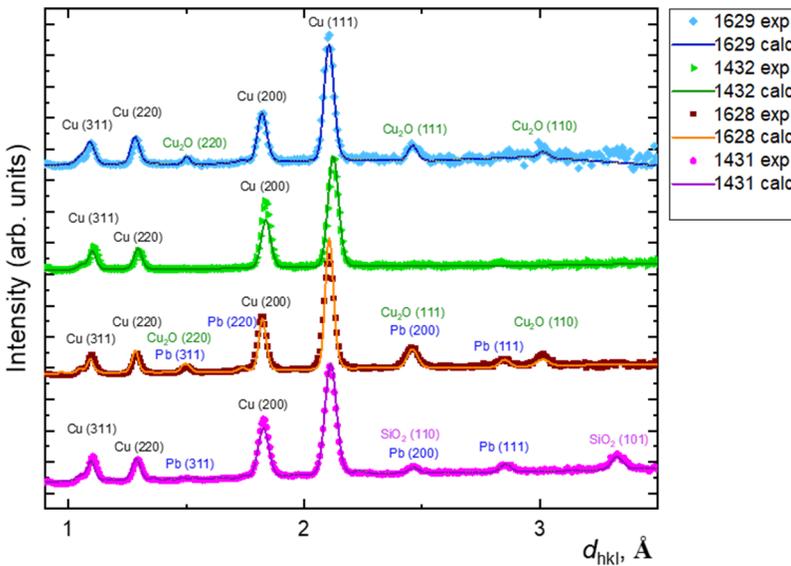


Рис. 2. Участки нейтронных дифракционных спектров исследуемых бронзовых крестов. Представлены экспериментальные точки и рассчитанный по методу Ритвельда профиль. Отмечены дифракционные пики, соответствующие различным фазам материала крестов и коррозии, и указаны их индексы Миллера

Нейтронные дифракционные спектры створок креста-энколпиона № 1645/1 и 1645/2, полученные на дифрактометре ДИСК (Glazkov et al. 1988), имеют схожую форму со спектрами других крестов. Наиболее интенсивные дифракционные рефлексы соответствуют кубической фазе меди с пространственной группой $Fm\bar{3}m$. Кроме этого, наблюдаются слабые рефлексы от коррозионных материалов. Анализ дифракционных данных указывает на доминирующую фазу коррозии – куприт Cu_2O с пространственной группой $Pn\bar{3}m$. Для закрытых крестов-энколпионов

№ 1431 и 1629 обнаружены дифракционные рефлексы от кубической фазы свинца (Грешников и др. 2020). В кресте № 1431 обнаружено присутствие тригональной фазы диоксида кремния с пространственной группой $R\bar{3}m$. Рассчитанное объемное содержание этой фазы составило 10,4(4)%. Это может указывать на присутствие песка в качестве возможного загрязнения поверхности или внутренней полости креста-энколпиона.

Анализируя изменения параметра элементарной ячейки кубической фазы меди, можно оценить содержание олова в бронзовом сплаве (Sidot et al. 2005), из которого изготовлены кресты. Рассчитанное из данных нейтронной дифракции относительное содержание меди и олова в бронзовом материале крестов представлено в табл. 1.

Таблица 1
Рассчитанные из данных нейтронной дифракции объемные содержания различных фаз и относительное содержание олова в бронзовом материале крестов, %

№ образца	Объемное содержание $Cu_2O\%$	Объемное содержание Pb	Содержание Sn в бронзе
1431	–	7,82	4,99
1628	19,29	7,40	4,09
1432	–	–	6,84
1629	23,74	–	3,78
1645/1и 2	–	1,1	4,82

Нейтронная томография

Для исследования пространственного распределения различных фаз и особенно коррозии в объеме исследуемых образцов привлекался метод нейтронной томографии. Из набора угловых радиографических проекций были восстановлены трехмерные (3D) или объемные модели строения каждого из исследуемых крестов.

Восстановленная из данных нейтронной томографии 3D-модель креста-энколпиона № 1431 представлена на рис. 3. Что интересно, внутри этого энколпиона обнаружен некий объект вытянутой формы, предположительно состоящий из оксида кремния или песка. Предполагается, что это минерализованные остатки фрагментов внутреннего содержания креста-энколпиона. Эта находка расширяет пока еще немногочисленный список древнерусских энколпионов с достоверно зафиксированными остатками помещенных в них реликвий (Макаров и др. 2020). С помощью процедуры сегментации трехмерных данных из общего объема энколпиона № 1431 были выделены соответствующие объемы бронзы и фрагментов остатков содержания. Если общий объем образца составляет 12 359 580 вокселей, что соответствует 1,74 см³, то объем внутреннего содержания – 0,006 см³. Объем внутренней полости составляет 0,24 см³.

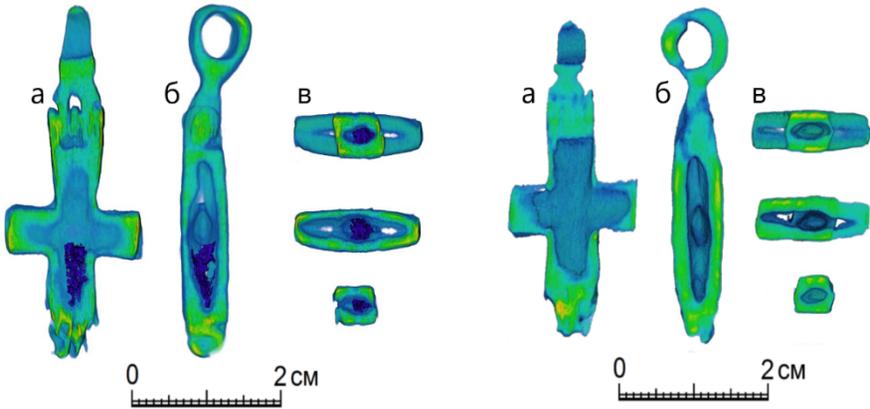


Рис. 3. Восстановленные из данных нейтронной томографии трехмерные модели крестов-энколпионов № 1431 – слева, № 1628 – справа; а, б – продольные срезы; в – поперечные сверху вниз. Здесь и на рис. 4, 5 цветовая схема представляет диапазон коэффициентов ослабления нейтронного пучка в бронзовом объекте: от красных регионов, соответствующих максимальному поглощению, до синих участков, характеризующих низкое сечение полного поглощения нейтронов. Масштабная шкала соответствует 1 см

По данным нейтронной томографии, образец № 1628 пустой. Предполагается, что присутствие купритной коррозии в местах соединения створок креста определяет потерю герметичность закрытия энколпиона, и, как следствие, утраты содержимого. Объем бронзового креста № 1628 составляет $1,13 \text{ см}^3$, объем внутренней полости – $0,22 \text{ см}^3$. Объем материала объекта – бронзы – составляет $0,94 \text{ см}^3$, а областей, богатых купритом, – $0,19 \text{ см}^3$. Это около 16,8% от общего объема исходного материала.

Восстановленные трехмерные модели нательных крестов № 1432 и 1629 представлены на рис. 4. Видно, что образцы разной степени сохранности. Эмалированные вставки не сохранились. Образец № 1629 сильно корродирован. Если весь объем образца составляет $1,08 \text{ см}^3$, то областей, соответствующих коррозии, – $0,29 \text{ см}^3$, или 27,1% от всего объема образца.

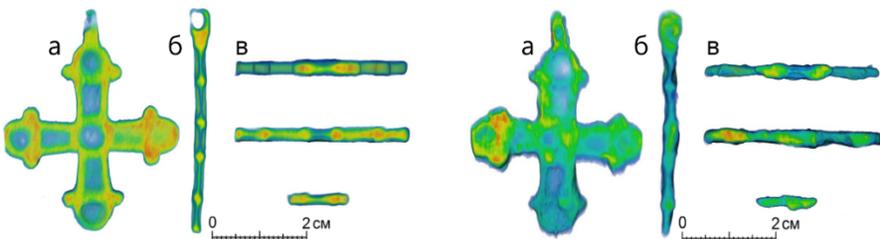


Рис. 4. Восстановленные из данных нейтронной томографии трехмерные модели нательных крестов № 1432 – слева, № 1629 – справа; а, б – продольные срезы, в – поперечные сверху вниз

Восстановленная объемная модель креста-энколпиона № 1645 представлена на рис. 5.

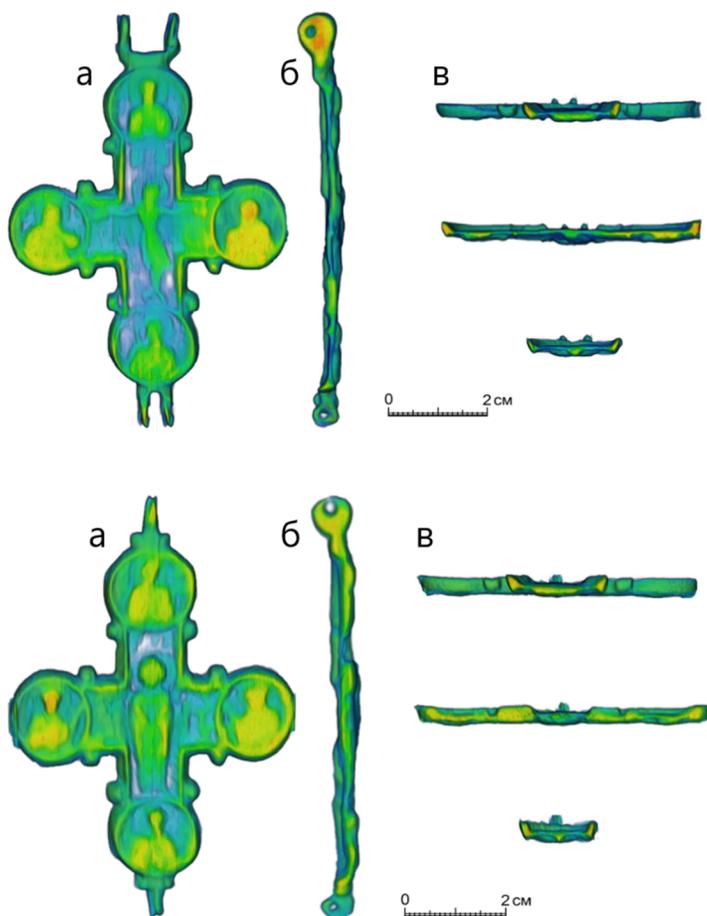


Рис. 5. Восстановленные из данных нейтронной томографии трехмерная модель креста-энколпиона № 1645/1 – сверху, № 1645/2 – снизу; а, б – продольные срезы, в – поперечные сверху вниз

В отличие от образцов № 1629 и 1628, больших объемов коррозии и ее проникновения в толщу материала креста не обнаружено. Так, по краям соединительных частей присутствует небольшое количество коррозионного материала, однако соответствующие области занимают не более $0,01 \text{ см}^3$, что при общем объеме материала креста $4,37 \text{ см}^3$ составляет только 0,22%.

Рентгенофлуоресцентный анализ

Анализ элементного состава исследуемых крестов с их поверхности проведен с помощью рентгенофлуоресцентного анализа. Прямоконечные кресты-энколпионы № 1431 и 1628 исследовались с двух сторон: лицевая и обратная, а створки энколпиона № 1645/1 и 1645/2 измерялись отдельно. На нательных крестах № 1432 и 1629 выбирались точки для измерений на перегородках и в центральных выемках на предполагаемом месте присутствия эмали. Все измерения проводились в трех отдельных точках, а полученные в них значения усреднялись. Результаты РФА крестов представлены в табл. 2. Известно, что метод рентгенофлуоресцентного анализа имеет существенное ограничение по глубине проникновения в толщу металлических объектов, поэтому данные о элементном составе соответствует только поверхностным слоям исследуемых крестов.

Таблица 2

Результаты элементного состава для исследуемых крестов по данным РФА, %

№ образца	Сторона	Cu	Sn	Fe	Zn	As	Ag	Sb	Pb
1431	Лицевая	63,82	10,38	2,58	0,97	1,14	0,25	0,52	20,34
	оборотная	57,92	14,99	2,75	1,61	1,52	0,26	0,56	20,39
1628	Лицевая	41,74	15,39	1,65	7,72	1,62	0,41	0,79	31,09
	оборотная	42,66	12,84	1,87	7,70	1,72	0,37	0,71	32,13
1645/1	Внешняя	71,19	16,73	0,59	–	0,52	0,36	0,72	9,89
	внутренняя	92,52	4,25	0,16	–	–	0,08	0,23	2,76
1645/2	Внешняя	78,35	15,36	1,11	–	0,09	0,15	0,47	4,47
	внутренняя	91,30	6,78	0,52	–	–	0,06	0,22	1,12
1432	Перегородка	72,22	22,25	0,32	–	0,64	0,19	0,51	3,87
	выемка	70,98	19,84	0,39	–	0,84	0,18	0,42	7,64
1629	Перегородка	67,28	11,61	4,01	0,14	0,31	0,54	0,49	15,62
	выемка	5,09	7,40	3,58	0,07	2,76	–	0,22	80,88

Почти все исследованные в выборке кресты (5 ед.) выполнены из традиционной для древнерусской цветной металлообработки оловянно-свинцовой бронзы (CuSnPb), характеризующейся как высоким процентным содержанием олова (в пределах от 4,25 до 22,25%), так и повышенным содержанием свинца (от 1,12 до 80,88%). Один крест – № 1628 – выполнен из многокомпонентного сплава (CuSnPbZn), с содержанием цинка в пределах 7,7%. Из табл. 2 видно, что кресты № 1431, 1628 и 1629 характеризуются высоким, относительно остальных, содержанием свинца. Именно для этих крестов обнаружена кубическая фаза чистого свинца в экспериментах по нейтронной дифракции (см. табл. 1). Если для крестов № 1431 и 1628 объяснение таким высоким значениям содержания свинца в приповерхностном слое, скорее, лежит в

ликвационных и коррозионных процессах, то для креста № 1629 мы можем предположить иную интерпретацию. Возможно, в выемке проанализированного креста зафиксированы остатки свинцовой компоненты, входящей в рецептуру эмали. Такое сильное различие в содержании свинца для выемки и перегородки креста № 1629 косвенно подтверждает выдвинутое предположение об эмалировании лицевой поверхности.

Присутствие высокого содержания железа в крестах № 1431, 1629 и в меньшей степени в № 1628 указывает на присутствие оксидов и (или) гидратов железа на поверхности объектов из-за внешнего загрязнения и, как следствие, на высокую коррозионную деградацию этих крестов. Эти кресты длительное время находились во влажных почвах, которые характерны для городища Дубна. Известно, что железосодержащие продукты коррозии обычно состоят из гидроксильной группы соединений, характеризующихся повышенной концентрацией водорода (Зайцева и др. 2020). Эти соединения значительно ослабляют нейтронный пучок, и поэтому наблюдаются большие зоны ослабления нейтронного пучка в экспериментах по нейтронной томографии (см. рис. 3, 4).

Чтобы разделить вклады от поверхностного слоя и непосредственно от объема бронзы крестов, мы провели дополнительное исследование створки № 1645/2 с локальным удалением приповерхностного слоя патины. Как и ожидалось, относительное содержание меди практически не изменилось: 92,28%. В то же время среднее содержание олова уменьшилось до 4,04%. Содержание железа, как ожидаемого компонента коррозии и патины, уменьшилось примерно в 10 раз, до 0,06%. Содержания свинца и серебра (естественного спутника свинца) практически не изменились – 3,21 и 0,08% соответственно (см. табл. 2). Кроме этого, следует отметить, что высокое содержание олова на поверхности створок креста № 1645/1 и 1645/2 и его низкое содержание в бронзовом сплаве (см. табл. 1) указывает на вхождение олова не только непосредственно в материал креста, но и в качестве компонента коррозионного слоя. Предыдущие исследования бронзового креста из Суздаля показывают, что коррозионный слой на поверхности бронзовых объектов представляет собой в основном соли окислов олова с примесью фосфора. Кроме этого, большое различие в содержании меди для внешней и внутренней стороны створок энколпиона № 1645/1 и 1645/2 может указывать на деградацию исходного бронзового сплава через коррозионные процессы образования частичек SnO на поверхностях крестов, в том числе и увеличением купритной фазы (Колобылина и др. 2017).

Заключение

Исследования методом нейтронной томографии и радиографии предметов личного благочестия, происходящих из древнерусских

памятников, позволяет не только визуализировать скрытые в них внутренние заполнения, но и определить степень сохранности самого металла. В закрытом бронзовом кресте-энколпионе обнаружен фрагмент внутреннего содержания, представляющий собой, вероятно, минерализованный фрагмент остатков реликвии, доминирующей фазой которого является кварцит SiO_2 . Анализ фазового состава поверхности и внутреннего объема серии крестов, происходящих из раскопок древнерусского городища Дубна, и находок из его окрестностей, показал, что олово и свинец присутствуют в большом количестве в коррозионном слое, а содержание олова в самом сплаве – на уровне от 3,8 до 6,8%, свинца в диапазоне 7,4–7,8% у прямоконечных крестов, а у створок креста с миниатюрами – 1,1%. В одном случае (крест № 1629) повышенное содержание свинца (80,88%), зафиксированное методом РФА в выемке, указывает на возможные следы эмалирования лицевой стороны. Для каждого из исследованных крестов получена 3D-модель внутреннего распространения коррозии в виде фазы куприта, что позволит в дальнейшем проводить необходимые реставрационные мероприятия по обеспечению сохранности находок древнерусского периода.

Список источников

- Абрамзон М.Г., Сапрыкина И.А., Кичанов С.Е., Козленко Д.П., Назаров К. Исследование химического состава сплава боспорских билонных статеров III в. н.э. методами РФА-спектроскопии, нейтронной томографии и дифракции // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2018. № 2. С. 24–28.
- Балдуев С.Д. Энколпионы Суздальского ополя // *Исторический опыт мировых цивилизаций и Россия: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф.* Владимир: Изд-во ВолГУ, 2021. С. 383–390.
- Грешников Э.А., Пожидаев В.М., Малахов С.Н., Подурец К.М., Коваленко Е.С., Мурашев М.М., Глазков В.П., Говор Л.И., Преснякова Н.Н., Светогоров Р.Д., Дороватовский П.В., Трунькин И.Н. Исследования креста-энколпиона из Новодевичьего монастыря естественнонаучными методами // *Российская археология*. 2020. № 4. С. 165–183.
- Зайцева И.Е., Коваленко Е.С., Подурец К.М., Мурашев М.М. Древнерусские кресты-энколпионы: опыт нейтронной и синхротронной визуализации // «На одно крыло – серебряная, На другое – золотая...»: сб. ст. памяти Светланы Рябцевой. Кишинев, 2020. С. 353–362.
- Кайль В.А., Нечитайло В.В. Каталог нательных христианских крестов, подвесок и наклеек с изображением креста периода Киевской Руси X–XIII столетий. Луганск: Максимум, 2006.
- Колобылина Н.Н., Грешников Э.А., Васильев А.Л., Терещенко Е.Ю., Зайцева И.Е., Макаров Н.А., Кашикарров П.К., Яцишина Е.Б., Ковальчук М.В. Электронно-микроскопические исследования древнерусского декорированного чернью креста-энколпиона XII века // *Кристаллография*. 2017. Т. 62, № 4. С. 543–550.
- Колпакова Ю.В. Христианские древности населения Пскова и Псковской земли конца X – XVIII вв. (предметы личного благочестия): автореф. дис. ... канд. ист. наук. М., 2007.

- Макаров Н.А., Грешиников Э.А., Зайцева И.Е., Подурец К.М., Коваленко Е.С., Мурашев М.М. Невидимые святыни. Вложения в средневековых крестах-энколпионах по данным комплексных аналитических исследований // Краткие сообщения Института археологии РАН. 2020. № 258. С. 25–45.
- Недошивина Н.Г. Металлические кресты-тельники домонгольской Руси // Церковная археология. Материалы Первой Всероссийской конференции. СПб.: Отдел ОП Петербургкомстата, 1995. С. 69–71.
- Петров Ф.Н., Зинин И.А. Обследование городища Дубна // Археологические открытия 2009 года. М.: Институт археологии РАН, 2013. С. 120–122.
- Петров Ф.Н., Пантелеева Л.В. Обследование территории г. Дубна в 2012–2013 гг. // Археологические открытия 2010–2013 гг. М.: Институт археологии РАН, 2015. С. 233–235.
- Сапрыкина И.А., Гунчина О.Л. Химический состав металла боспорских статеров Фанагорийского клада 2011 г. // Фанагория. Результаты археологических исследований / под общ. ред. В.Д. Кузнецова. Т. 5: Абрамзон М.Г., Кузнецов В.Д. Клад позднебоспорских статеров из Фанагории. М.: Институт археологии РАН, 2017. С. 272–483.
- Сапрыкина И.А., Кичанов С.Е., Козленко Д.П., Лукин Е.В. Возможности нейтронной томографии в археологии на примере исследования древнерусских украшений из тверского клада 2014 г. // Российская археология. 2018. № 3. С. 36–42.
- Смирнова В.С., Кичанов С.Е., Петров Ф.Н., Пантелеева Л.В., Бакиров Б.А., Козленко Д.П. Структурные исследования бронзового зооморфного навершия с Пекуновского селища методами нейтронной дифракции и томографии // Письма в ЭЧАЯ. 2022. Т. 19, № 4(243). С. 355–363.
- Bakirov B., Saprykina I., Kichanov S., Mimokhod R., Sudarev N., Kozlenko D. Phase Composition and Its Spatial Distribution in Antique Copper Coins: Neutron Tomography and Diffraction Studies // J. Imaging. 2021. № 7 (8). P. 129. doi: 10.3390/jimaging7080129
- Brun F., Massimi L., Fratini M., Dreossi D., Billé F., Accardo A., Pugliese R., Cedola, A. SYRMEP Tomo Project: a graphical user interface for customizing CT reconstruction workflows // Advanced Structural and Chemical Imaging. 2017. № 3. P. 1–9.
- Glazkov V.P., Naumov I.V., Somenkov V.A., Shil'shtein S.Sh. Superpositional many-detector systems and neutron diffraction of microsamples // Nucl. Instrum. Methods. 1988. № 264. P. 367–374.
- Kardjilov N., Festa G. Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- Kichanov S., Saprykina I., Kozlenko D., Nazarov K., Lukin E., Rutkauskas, A., Savenko B. Studies of Ancient Russian Cultural Objects Using the Neutron Tomography Method // J. Imaging. 2018. № 4. P. 25. doi: 10.3390/jimaging4020025
- Koval V.Yu., Dmitriev A.Yu., Borzakov S.B., Chepurchenko O.E., Filina Yu.G., Smirnova V.S., Lobachev V.V., Chepurchenko N.N., Zhomartova A.Zh., Lennik S.G. Elemental analysis of the molding paste of medieval oriental faïences // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2020a. Vol. 17, № 6. P. 893–899.
- Koval V.Yu., Dmitriev A.Yu., Smirnova V.S., Lobachev V.V. Using XRF analysis to determine the elemental composition of pigments in the painting of medieval oriental faïences // Proceedings of XXVII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-27), Dubna, Russia, June 10–14, 2019, JINR, E3-2020-10. Dubna, 2020b. P. 179–186.
- Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Lukin E.V., Rutkauskas A.V., Belushkin A.V., Bokuchava G.D., Savenko B.N. Neutron radiography and tomography facility at IBR-2 reactor // Phys. Part. Nucl. 2016. № 13. P. 346–351.
- Mednikova M., Saprykina I., Kichanov S., Kozlenko D. The Reconstruction of a Bronze Battle Axe and Comparison of Inflicted Damage Injuries Using Neutron Tomography, Manufacturing Modeling, and X-ray Microtomography Data // J. Imaging. 2020. № 6. P. 45.
- Podurets K.N., Kichanov S.E., Glazkov V.P., Kovalenko E.S., Murashev M.M., Kozlenko D.P., Lukin E.V., Yatsishina E.B. Modern Methods of Neutron Radiography and Tomography in

- Studies of the Internal Structure of Objects // *Crystallography Reports*. 2021. № 2 (66). P. 254–266.
- Rodriguez-Carvajal J. Recent Advances in Magnetic Structure Determination by Neutron Powder Diffraction // *Phys. BCondens. Matter*. 1993. № 192. P. 55–69.
- Saprykina I., Kichanov S., Kozlenko D. Possibilities, Limitations, and Prospects of Using Neutron Tomography and Radiography for Preservation of Archaeological Heritage Objects // *Crystallography Reports*. 2019. Vol. 64. P. 177–180.
- Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis // *Nat. Methods*. 2012. № 9. P. 671–675.
- Sedyshchev P.V., Shvetsov V.N., Abramzon M.G., Saprykina I.A. Determining the Elemental Composition of Antique Coins of Phanagorian Treasure by Neutron Spectroscopy at the Pulsed Neutron Source IREN in FLNP JINR // *Phys. Part. Nucl. Lett*. 2020. № 17. P. 389–400.
- Sidot E., Kahn-Harari A., Cesari E., Robbiola L. The Lattice Parameter of α -bronzes as a Function of Solute Content: Application to Archaeological Materials // *Mater. Sci. Eng. A*. 2005. Vol. 393. P. 147–156.

References

- Abramzon M.G., Saprykina I.A., Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Nazarov K. (2018) Issledovanie khimicheskogo sostava splava bosporskikh bilonnykh staterov III v. n.e. metodami RFA-spektroskopii, neitronnoi tomografii i difraktsii [Investigation of Chemical Composition of the Alloy of 3rd Century Bosphoran Billon Staters by XRF Analysis, Neutron Tomography and Diffraction], *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniia*, no. 2, pp. 24–28.
- Balduev S.D. (2021) Enkolpiony Suzdal'skogo opol'ia [Encolpions of the Suzdal Opole]. In: *Istoricheskii opyt mirovykh tsivilizatsii i Rossiia: materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [The historical experience of world civilizations and Russia: materials of the IX International Scientific and Practical Conference]. Vladimir: Izd-vo VolGU, pp. 383–390.
- Greshnikov E.A., Pozhidaev V.M., Malakhov S.N., Podurets K.M., Kovalenko E.S., Murashev M.M., Glazkov V.P., Govor L.I., Presniakova N.N., Svetogorov R.D., Dorovatovskii P.V., Trun'kin I.N. (2020) Issledovaniia kresta-enkolpiona iz Novodevich'ego monastyrja estestvennonauchnymi metodami [Study of A Reliquary Cross from The Novodevichy Convent with Natural Science Techniques], *Rossiiskaia arkheologiia*, no. 4, pp. 165–183.
- Zaitseva I.E., Kovalenko E.S., Podurets K.M., Murashev M.M. (2020) Drevnerusskie kresty-enkolpiony: opyt neitronnoi i sinkhrotronnoi vizualizatsii [Ancient Russian Encolpion crosses: the practice of neutron and synchrotron imaging]. In: *Na odno krylo — serebrianaia, Na drugoe — zolotaia...* Sbornik statei pamiati Svetlany Riabtsevoi [“On one wing — silver, On the other — gold ...” Collection of articles in memory of Svetlana Ryabtseva]. Kishinev, pp. 353–362.
- Kail' V.A., Nechitailo V.V. (2006) *Katalog natel'nykh khristianskikh krestov, podvesok i nakladok s izobrazheniem kresta perioda Kievskoi Rusi X–XIII stoletii* [Catalog of Christian crosses, pendants and overlays depicting the cross of the Kievan Rus period of the X–XIII centuries]. Lugansk: PTs «Maksim».
- Kolobyliina N.N., Greshnikov E.A., Vasil'ev A.L., Tereshchenko E.Iu., Zaitseva I.E., Makarov N.A., Kashkarov P.K., Iatsishina E.B., Koval'chuk M.V. (2017) Elektronno-mikroskopicheskie issledovaniia drevnerusskogo dekorirovannogo chem'iu kresta-enkolpiona XII veka [Electron Microscopy Study of An Old Russian (XII Century) Encolpion Cross with Black Inlay], *Kristallografiia*, Vol. 62, no. 4, pp. 543–550.
- Kolpakova Iu.V. (2007) *Khristianskie drevnosti naseleniia Pskova i Pskovskoi zemli kontsy X–XVIII vv. (predmety lichnogo blagochestiia)*. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata istoricheskikh nauk [Christian antiquities of the population of Pskov and

- the Pskov land of the late X – XVIII centuries (objects of personal piety). Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Historical Sciences]. Moscow.
- Makarov N.A., Greshnikov E.A., Zaitseva I.E., Podurets K.M., Kovalenko E.S., Murashev M.M. (2020) Nevidimye sviatyni. Vlozheniia v srednevekovykh krestakh-enkolpionakh po dannym kompleksnykh analiticheskikh issledovaniia [Invisible Holy Relics. Relics And Materials Inserted in Medieval Reliquary Crosses Based on The Data from Comprehensive Analytical Studies], *Kratkie soobshcheniia Instituta arkheologii RAN*, no. 258, pp. 25–45.
- Nedoshivina N.G. (1995) Metallicheskie kresty-tel'niki domongol'skoi Rusi [Metal crosses of pre-Mongol Russia]. In: *Tserkovnaia arkheologiia. Materialy Pervoi Vserossiiskoi konferentsii* [Church archaeology. Materials of the First All-Russian Conference]. St. Petersburg: Otdel OP Peterburgkomstata, pp. 69–71.
- Petrov F.N., Zinin I.A. (2013) Obsledovanie gorodishcha Dubna [Survey of the Dubna settlement]. In: *Arkheologicheskie otkrytiia 2009 goda* [Archaeological discoveries in 2009]. Moscow: Institut arkheologii RAN, pp. 120–122.
- Petrov F.N., Panteleeva L.V. (2015) Obsledovanie territorii g. Dubna v 2012–2013 gg. [Survey of the territory of Dubna in 2012–2013.]. In: *Arkheologicheskie otkrytiia 2010–2013 gg.* [Archaeological discoveries in 2010–2013]. Moscow: Institut arkheologii RAN, pp. 233–235.
- Saprykina I.A., Gunchina O.L. (2017) Khimicheskii sostav metalla bosporskikh staterov Fanagoriiskogo klada 2011 g. [The chemical composition of the metal of the Bosporan stater of the Phanagoria treasure of 2011]. In: *Fanagoriia. Rezul'taty arkheologicheskikh issledovaniia* [Phanagoria. The results of archaeological research] / ed. by. V.D. Kuznetsov. Vol. 5: Abramzon M.G., Kuznetsov V.D. Klad pozdnobosporskikh staterov iz Fanagorii [A treasure trove of Late Bosporan stater from Phanagoria]. Moscow: Institut arkheologii RAN, pp. 272–483.
- Saprykina I.A., Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Lukin E.V. (2018) Vozmozhnosti neitronnoi tomografii v arkheologii na primere issledovaniia drevnerusskikh ukrashenii iz tverskogo klada 2014 g. [The Capabilities of Neutron Tomography in Archaeology on an Example of The Study of Old Russian Jewelry from The Tver Hoard of 2014], *Rossiiskaia Arkheologiia*, no. 3, pp. 36–42.
- Smirnova V.S., Kichanov S.E., Petrov F.N., Panteleeva L.V., Bakirov B.A., Kozlenko D.P. (2022) Strukturnye issledovaniia bronzovogo zoomorfno go navershiia s Pekunovskogo selishcha metodami neitronnoi difraktsii i tomografii [Structural Studies of a Bronze Zoomorphic Pommel from The Pekunovsky Settlement Using Neutron Diffraction and Tomography Methods]. *Physics of Particles and Nuclei Letters*, Vol. 19, no. 4(243), pp. 355–363.
- Bakirov B., Saprykina I., Kichanov S., Mimokhod R., Sudarev N., Kozlenko D. (2021) Phase Composition and Its Spatial Distribution in Antique Copper Coins: Neutron Tomography and Diffraction Studies, *J. Imaging*, 7 (8), 129. <https://doi.org/10.3390/jimaging7080129>
- Brun F., Massimi L., Fratini M., Dreossi D., Billé F., Accardo A., Pugliese R., Cedola A. (2017) SYRMEP Tomo Project: a graphical user interface for customizing CT reconstruction workflows, *Advanced Structural and Chemical Imaging*, no. 3, pp. 1–9.
- Glazkov V.P., Naumov I.V., Somenkov V.A., Shil'shtein S.Sh. (1988) Superpositional many-detector systems and neutron diffraction of microsamples. *Nucl. Instrum. Methods*, 264, pp. 367–374.
- Kardjilov N., Festa G. (2016) *Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage*. Springer International Publishing: Cham, Switzerland.
- Kichanov S., Saprykina I., Kozlenko D., Nazarov K., Lukin E., Rutkauska, A., Savenko B. (2018) Studies of Ancient Russian Cultural Objects Using the Neutron Tomography Method, *J. Imaging*, 4(2), 25. doi: 10.3390/jimaging4020025
- Koval V.Yu., Dmitriev A.Yu., Borzakov S.B., Chepurchenko O.E., Filina Yu.G., Smirnova V.S., Lobachev V.V., Chepurchenko N.N., Zhomartova A.Zh., Lennik S.G. (2020a)

- Elemental analysis of the molding paste of medieval oriental faiences, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, Vol. 17, № 6, pp. 893–899.
- Koval V.Yu., Dmitriev A.Yu., Smirnova V.S., Lobachev V.V. (2020b) Using XRF analysis to determine the elemental composition of pigments in the painting of medieval oriental faiences. In: Proceedings of XXVII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-27), Dubna, Russia, June 10–14, 2019, JINR, E3-2020-10. Dubna, pp. 179–186.
- Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Lukin E.V., Rutkauskas A.V., Belushkin A.V., Bokuchava G.D., Savenko B.N. (2016) Neutron radiography and tomography facility at IBR-2 reactor, *Phys. Part. Nucl.* no. 13, pp. 346–351.
- Mednikova M., Saprykina I., Kichanov S., Kozlenko D. (2020) The Reconstruction of a Bronze Battle Axe and Comparison of Inflicted Damage Injuries Using Neutron Tomography, Manufacturing Modeling, and X-ray Microtomography Data, *J. Imaging*, 6, 45.
- Podurets K.N., Kichanov S.E., Glazkov V.P., Kovalenko E.S., Murashev M.M., Kozlenko D.P., Lukin E.V., Yatsishina E.B. (2021) Modern Methods of Neutron Radiography and Tomography in Studies of the Internal Structure of Objects, *Crystallography Reports*, no. 2(66), pp. 254–266.
- Rodriguez-Carvajal J. (1993) Recent Advances in Magnetic Structure Determination by Neutron Powder Diffraction, *Phys. BCondens. Matter.* no. 192, pp. 55–69.
- Saprykina I., Kichanov S., Kozlenko D. (2019) Possibilities, Limitations, and Prospects of Using Neutron Tomography and Radiography for Preservation of Archaeological Heritage Objects, *Crystallography Reports*, Vol. 64, pp. 177–180.
- Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. (2012) NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nat. Methods.* no. 9, pp. 671–675.
- Sedyshev, P.V., Shvetsov, V.N., Abramzon, M.G., Saprykina, I.A. (2020) Determining the Elemental Composition of Antique Coins of Phanagorian Treasure by Neutron Spectroscopy at the Pulsed Neutron Source IREN in FLNP JINR, *Phys. Part. Nucl. Lett.*, no. 17, pp. 389–400.
- Sidot E., Kahn-Harari A., Cesari E., Robbiola L. (2005) The Lattice Parameter of α -bronzes as a Function of Solute Content: Application to Archaeological Materials, *Mater. Sci. Eng. A.* Vol. 393, pp. 147–156.

Сведения об авторах:

СМИРНОВА Вероника Сергеевна – младший научный сотрудник, Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Россия). E-mail: veronicasm@jinr.ru

ПЕТРОВ Федор Николаевич – кандидат философских наук, заместитель директора Учебно-научного центра изучения проблем природы и человека, Челябинский государственный университет (Челябинск, Россия). E-mail: steppe_exp@mail.ru

ПАНТЕЛЕЕВА Лариса Владимировна – специалист по экспозиционно-выставочной деятельности, Музей Дубны; научный сотрудник, Московский областной общественный фонд историко-культурных исследований и гуманитарных инициатив «Наследие» (Дубна, Россия). E-mail: lori68@list.ru

БАКИРОВ Булат Айратович – стажер-исследователь, Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Россия); Казанский федеральный университет (Казань, Россия). E-mail: Bulatbakirov4795@gmail.com

КИЧАНОВ Сергей Евгеньевич – доктор технических наук, начальник группы, Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Россия). E-mail: ekich@nf.jinr.ru

КОЗЛЕНКО Денис Петрович – доктор физико-математических наук, начальник отдела, Объединенный институт ядерных исследований (Дубна, Россия). E-mail: denk@nf.jinr.ru

САПРЫКИНА Ирина Анатольевна – кандидат исторических наук, старший научный сотрудник, Институт археологии РАН (Москва, Россия). E-mail: dolmen200@mail.ru

МУРАШЕВ Михаил Михайлович – младший научный сотрудник, Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (Москва, Россия). E-mail: mihail.mmm@inbox.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Veronika S. Smirnova, Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russian Federation). E-mail: veronicasm@jinr.ru

Fedor N. Petrov, Chelyabinsk State University (Chelyabinsk, Russian Federation). E-mail: steppe_exp@mail.ru

Larisa V. Panteleeva, Museum of Dubna; Nasledie Regional Public Foundation for Historical and Cultural Research and Humanitarian Initiatives (Dubna, Russian Federation). E-mail: lori68@list.ru

Bulat A. Bakirov, Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russian Federation); Kazan Federal University (Kazan, Russian Federation). E-mail: Bulatbakirov4795@gmail.com

Sergey E. Kichanov, Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russian Federation). E-mail: ekich@nf.jinr.ru

Denis P. Kozlenko, Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russian Federation). E-mail: denk@nf.jinr.ru

Irina A. Saprykina, Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation). E-mail: dolmen200@mail.ru

Mikhail M. Murashev, National Research Centre “Kurchatov Institute” (Moscow, Russian Federation). E-mail: mihail.mmm@inbox.ru

The authors declare no conflict of interests.

*Статья поступила в редакцию 08 декабря 2022;
принята к публикации 16 ноября 2023.*

*The article was submitted 08.12.2022;
accepted for publication 16.11.2023.*