

## СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БРОНЗОВОГО ЗООМОРФНОГО НАВЕРШИЯ С ПЕКУНОВСКОГО СЕЛИЩА МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ И ТОМОГРАФИИ

*В. С. Смирнова<sup>a,1</sup>, С. Е. Кичанов<sup>a</sup>, Ф. Н. Петров<sup>b,6</sup>,  
Л. В. Пантелеева<sup>z,6</sup>, Б. А. Бакиров<sup>a</sup>, Д. П. Козленко<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>b</sup> Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>6</sup> Московский областной общественный фонд историко-краеведческих исследований  
и гуманитарных инициатив «Наследие», Дубна, Россия

<sup>z</sup> Муниципальное автономное учреждение культуры города Дубны Московской области  
«Музей Дубны», Дубна, Россия

Неразрушающими структурными методами нейтронной дифракции и томографии исследован фазовый состав и пространственное распределение химических компонентов внутри объема бронзового зооморфного навершия, изображающего медведя, относящегося к ананьинской культурно-исторической области I тысячелетия до н. э. Навершие обнаружено на окраине Пекуновского селища в окрестностях города Дубны Московской обл. Установлено, что зооморфная фигурка была изготовлена из оловянистой бронзы и содержит две основные кристаллические фазы — бронзы и куприта  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Из восстановленных нейтронных томографических данных выявлено неравномерное распределение фазовых компонентов внутри объема фигурки, что может указывать на глубокое проникновение продуктов коррозии — куприта — внутрь объема изделия. Получены объемные содержания бронзы и коррозии, рассчитана концентрация олова в бронзовом сплаве.

The phase composition and spatial distribution of chemical components within the volume of a bronze zoomorphic bear-shaped pommel have been studied using nondestructive structural methods of neutron diffraction and neutron tomography. The pommel, which belongs to the Ananyino cultural and historical region of the 1st millennium BC, was found close to the Pekunovsky settlement near Dubna, Moscow region. It was found that the zoomorphic pommel was made of tin bronze and contains two main crystalline phases: bronze and cuprite  $\text{Cu}_2\text{O}$ . The uneven distribution of phase components within the volume of the pommel was revealed from the reconstructed neutron tomographic data. It was indicating a deep penetration of corrosion products like copper cuprite into the volume of the item. The volumetric contents of bronze and corrosion were obtained, and the concentration of tin in the bronze alloy was calculated.

PACS: 61.05.F., 61.12.-q

---

<sup>1</sup>E-mail: veronicasm@jinr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в археологических исследованиях как в Российской Федерации, так и в зарубежных странах наблюдается значительный рост интереса к исследованиям археологических находок методами неразрушающей структурной диагностики [1, 2]. Среди таких методов исследования особо выделяются методы нейтронно-структурной диагностики [3]: нейтронная радиография и томография, нейтронная дифракция. Особенности взаимодействия нейтронов с веществом определяют основные преимущества таких методов над классическими рентгеновскими: это высокая проникающая способность нейтронов в исследованиях массивных, в том числе металлических, объектов и материалов; чувствительность к водородосодержащим фазовым компонентам; возможность разделения и структурного анализа минеральных фаз исследуемых объектов культурного наследия и др. Методы нейтронно-структурной диагностики уже прекрасно зарекомендовали себя в исследованиях древнерусских украшений [4], античных монет Боспора [5] и древней Булгарии [6], фрагментов керамики [7] и бронзового оружия [8]. В Лаборатории нейтронной физики (ЛНФ) Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, Дубна, Московская обл.) реализован целый экспериментальный комплекс нейтронно-структурной диагностики материалов [9], который включает в себя специализированные установки для исследований методами нейтронно-структурной томографии [10], нейтронно-структурной дифракции [11], нейтронного активационного анализа [12]. Неразрушающие исследования обеспечивают исключительно бережное отношение к исследуемым археологическим материалам, имеющим высокую научную и музейную ценность. А главное — нейтронные методы позволяют получить новую уникальную информацию о фазовом и элементном составе археологических объектов, о скрытых компонентах или внутреннем декоре древних изделий, об определенных особенностях древних технологий производства [4, 7].

В фондах муниципального Музея Дубны хранится: целый ряд коллекций с археологической экспедиции музея и Московского областного общественного фонда историко-краеведческих исследований и гуманитарных инициатив «Наследие», в которой были проведены исследования на территории города Дубны Московской области [13, 14], а также результаты подъемных сборов, проведенных в разные годы в размываемой рекой Волгой прибрежной части археологических памятников. К числу последних относится бронзовое зооморфное навершие рукоятки ножа или жезла, выполненное в форме верхней части головы медведя и примыкающей к ней шкуры с лапами (рис. 1). Этот артефакт был обнаружен у южной окраины Пекуновского селища — многослойного археологического памятника площадью более 4,0 тыс. м<sup>2</sup>, расположенного в Тверской области на левом берегу Волги, у северной границы города Дубны, рядом с деревней Крева. В 1965–1966 гг. А. В. Успенская исследовала 140 м<sup>2</sup> этого селища. Ею были изучены два древнерусских жилища XI–XIII вв. Установлено, что в основании культурного слоя Пекуновского селища залегают материалы стоянок эпохи мезолита и неолита, выше — остатки поселка дьяковской культуры раннего железного века, над ними — культурный слой древнерусского поселения [15]. У северной окраины Пекуновского селища расположено Пекуновское городище дьяковской культуры. В 1932–1933 гг. под руководством О. Н. Бадера было исследовано 417 м<sup>2</sup> в северной части Пекуновского городища. Установлено, что культурный слой этого памятника содержит многочисленные остатки дьяковской культуры раннего



Рис. 1. Изображение бронзового навершия в форме головы, шкуры и лап медведя. Номерами обозначены локальные участки фигурки, для которых получены нейтронные дифракционные данные

железного века [16], которые с точки зрения современной археологии могут быть отнесены к раннедьяковскому этапу, датирующемуся периодом с VII/VI по III/II в. до н. э. [17].

Образ медведя был очень популярен в искусстве и религиозных верованиях многих народов и племен начиная с эпохи среднего палеолита. Этот образ также широко представлен в характерной зооморфной пластике ананьинской культурно-исторической области (КИО) раннего железного века Среднего Поволжья и Прикамья [18]. Присутствует он и в материалах дьяковской культуры Верхневолжья и Волго-Окского междуречья [19]. Именно для ананьинской КИО характерен наиболее узнаваемый и широко распространенный «звериный стиль» в искусстве раннего железного века лесной зоны Восточной Европы [20]. По серии аналогий можно предполагать именно ананьинское происхождение пекуновского медведя [21]. Возможно, он был частью ананьинского металлического импорта на территорию дьяковской культуры. Особенный интерес представляет то, что пекуновская фигурка, служившая навершием для деревянной или костяной рукояти, судя по всему, изображает не живого медведя, а снятую с него шкуру вместе с лапами и верхнюю часть его головы. Это хорошо узнаваемый образ, связанный с ритуальным переодеванием человека в медведя, которое было широко известно у лесных народов Евразии [22].

Пекуновское бронзовое навершие было изучено современными неразрушающими методами нейтронной структурной диагностики на импульсном высокопоточном реакторе ИБР-2 с целью изучения технологических особенностей и процессов бронзового литья предметов предположительно ананьинской КИО, распространения коррозии в бронзовых сплавах I тысячелетия до н. э., степени влияния коррозионных процессов на сохранность и физические свойства древних металлических изделий. Это может

быть интересным для решения проблем современного материаловедения в применении к исследованиям археологических объектов.

## 1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Объект исследований представляет собой металлическое изделие вытянутой формы, размером  $5,5 \times 2,4 \times 1,4$  см; его поверхность корродирована, небольшой фрагмент в нижней части отливки обломан. Вероятно, изделие было изготовлено путем литья по восковой выплавляемой модели. Основным элементом зооморфного навершия является верхняя часть «головой» медведя, а вытянутая «шкура» вместе с «лапами» представляют собой, по-видимому, не только изображение, но и функциональный элемент крепежа на рукояти ножа или жезла. Поверхность изделия покрыта слоем коррозии зелено-бурого цвета, что затрудняет как внешнюю идентификацию, так и применение традиционных естественно-научных методов в археологических или реставрационных исследованиях, таких как рентгенофлуоресцентный анализ [5] или рентгеновская дифракция.

Исследования фазового состава бронзового навершия проводились с помощью метода нейтронной дифракции на специализированном дифрактометре ДН-6 [11] на высокопоточном реакторе ИБР-2 (ЛНФ ОИЯИ). Были получены несколько дифракционных спектров с различных локальных точек исследуемого изделия. Дифракционные спектры измеряли при углах рассеяния  $2\theta = 90^\circ$ . Для данных углов рассеяния разрешение дифрактометра при длине волны  $\lambda = 2 \text{ \AA}$  составляло  $\Delta d/d = 0,025$ . Характерное время измерения одного спектра — 10 мин. Анализ дифракционных данных производился методом Ритвельда с помощью программы FullProf [23].

Пространственное распределение фаз и компонентов внутри объема изделия восстанавливалось с помощью метода нейтронной радиографии и томографии на специализированной экспериментальной станции [10, 24] на 14-м канале импульсного высокопоточного 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 [25]. Полученная трехмерная модель представляет собой массив данных из трехмерных вокселей [26], 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  ${}^6\text{LiF/ZnS}$  толщиной 0,1 мм производства фирмы RC TRITEC Ltd (Швейцария). Проведение томографических экспериментов обеспечивает система гониометров HUBER с минимальным углом поворота до  $0,02^\circ$ . Полученные нейтронные данные корректируются с учетом фоновых шумов детекторной системы и нормализуются с учетом падающего нейтронного пучка с помощью программного пакета ImageJ [27]. Томографическая реконструкция из набора угловых проекций исследуемых объектов осуществляется программой SYRMEP Tomo Project [28]. Для визуализации и анализа получаемых трехмерных данных используется программный комплекс VGStudio MAX 2.2 фирмы Volume Graphics (Гейдельберг, Германия).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

**Нейтронная дифракция.** Пример нейтронного дифракционного спектра изучаемого бронзового навершия представлен на рис. 2.

Анализ полученных дифракционных спектров указывает на существование двух основных фаз в материале фигурки. Это кубическая фаза меди с пространственной группой  $Fm\bar{3}m$  и кубическая фаза куприта  $Cu_2O$  с пространственной группой  $Rn\bar{3}m$ . Образование купритной коррозии может свидетельствовать о долгом нахождении исследуемого бронзового объекта культурного наследия в закрытом пространстве или в сухих песчаных почвах без длительного доступа кислорода [29, 30]. Что интересно, дополнительных фаз сульфидов, хлоридов или гидратов меди, характеризующих длительное взаимодействие бронзы с щелочной средой, не обнаружено. Это может указывать на нахождение предмета в преимущественно сухой среде, например глубоко в песчано-глиняной почве [31].

Из анализа данных нейтронной дифракции методом Ритвельда можно получить относительное содержание меди и куприта в объеме исследуемой бронзовой фигурки медведя. Рассчитанные массовые доли меди и куприта для разных точек бронзовой фигурки представлены в таблице. Следует отметить, что исследуемая бронзовая фигурка довольно хорошо сохранилась в течение более чем 2000 лет: деградация бронзового материала не превышает 8–10 % от общего объема бронзы.

Бронза представляет собой сплав, в кристаллической структуре которого часть атомов меди замещается атомами олова. Поэтому параметр элементарной ячейки фазы

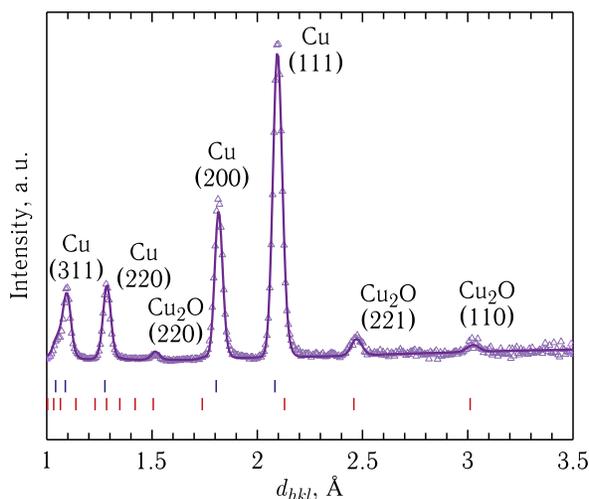


Рис. 2. Нейтронный дифракционный спектр исследуемой бронзовой фигурки медведя. Представлены экспериментальные точки и рассчитанный по методу Ритвельда профиль. Вертикальные штрихи соответствуют рассчитанным положениям дифракционных пиков для кубических фаз меди (верхний ряд) и оксида меди  $Cu_2O$  (нижний ряд). Отмечены дифракционные пики и их индексы Миллера, соответствующие различным фазам внутри объема фигурки

**Объемные содержания фаз бронзы, куприта и олова по данным нейтронной дифракции. Участки фигурки, с которых были получены спектры нейтронной дифракции для анализа, пронумерованы в соответствии с обозначениями на рис. 1**

Участок фигурки	Объемное содержание бронзы, %	Объемное содержание куприта, %	Объемное содержание олова, %
№1	91,5(5)	8,4(5)	2,6(5)
№2	94,6(7)	5,3(4)	1,2(9)
№3	93,9(5)	6,0(5)	1,8(8)

меди в бронзовом сплаве практически линейно зависит от концентрации олова [32], что позволяет оценить его концентрацию в металлическом сплаве исследуемого изделия. Полученные значения содержания олова представлены в таблице. Видно, что материал зооморфного наворачия можно отнести к литейным двухкомпонентным бронзам, характерным для раннего железного века [33]. Содержание олова в бронзовом сплаве попадает в диапазон характерных значений концентраций олова для бронзовых находок из поселения раннего железного века Волго-Окского междуречья [34]. Концентрация олова выше 1% и относительно небольшие изменения его объемной доли в зависимости от места фигурки указывают на искусственное происхождение сплава [35].

**Нейтронная томография.** Пространственное распределение фаз бронзы и куприта исследовалось методом нейтронной томографии. Из полученных 360 угловых радиографических проекций была восстановлена трехмерная (3D), или объемная, модель внутреннего строения исследуемой бронзовой фигурки [21]. Полученная трехмерная модель является массивом вокселей, каждый из которых характеризует коэффициент ослабления нейтронного пучка в определенной точке объема объекта. Восстановленная из данных нейтронной томографии 3D-модель исследуемой фигурки медведя представлена на рис. 3, а. Из-за разности коэффициентов ослабления нейтронного пучка для бронзы ожидается формирование хорошего радиографического контраста в экспериментах по нейтронной радиографии и томографии. Видно, что распределение фаз бронзы и куприта неравномерно в объеме фигурки. Ожидаемо, что концентрация фазы куприта максимальна ближе к поверхности исследуемой фигурки, но проникает достаточно глубоко в толщу фигурки. На рис. 3, б представлены поперечный и продольный срезы 3D-модели бронзовой фигурки. Глубина проникновения коррозии внутрь объема фигурки достигает от 0,5 до 5 мм.

С помощью процедуры сегментации трехмерных данных из общего объема изделия были выделены соответствующие объемы бронзы и куприта. Так, общий объем бронзовой фигурки состоит из 30 295 672 вокселей, что соответствует объему 4,26 см<sup>3</sup>. Объем бронзы составляет 3,79 см<sup>3</sup>, областей, богатых купритом, — 0,47 см<sup>3</sup>, что составляет около 11% от общего объема фигурки. Хотя разделение объемов бронзы и купритной коррозии в методе нейтронной томографии носит оценочный характер, видно, что полученные значения близки к данным нейтронной дифракции (см. таблицу).

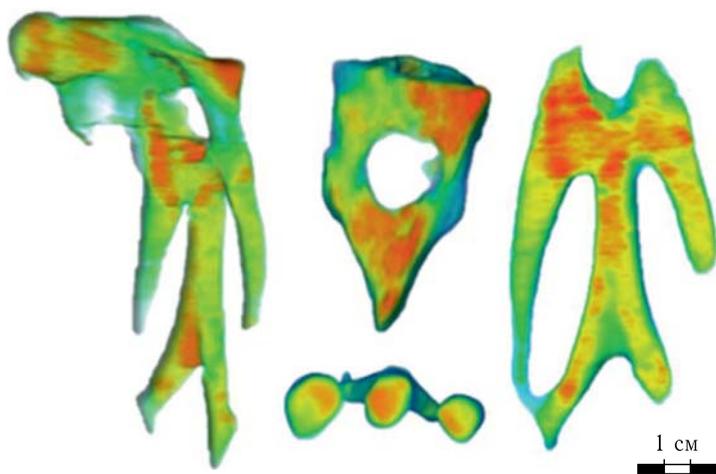


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Восстановленная из данных нейтронной томографии трехмерная модель исследуемой бронзовой фигурки. Цветовая схема представляет диапазон коэффициентов ослабления нейтронного пучка в бронзовом объекте: от красных регионов, соответствующих максимальному поглощению областями с высокой концентрацией бронзы, до зеленых участков, характеризующих низкое сечение полного поглощения нейтронов, относящихся к областям с высоким содержанием купритной коррозии. Также представлено несколько продольных и поперечных виртуальных срезов восстановленной трехмерной модели исследуемой фигурки

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Неразрушающими методами нейтронной дифракции и томографии исследованы особенности внутренней структуры бронзового зооморфного навершия, происходящего с Пекуновского селища. Навершие, вероятно, изображало снятую с медведя шкуру с головой и лапами, в которую мог облачаться человек в ходе ритуальных действий. На основании широкого круга аналогий можно предположить, что скорее всего это навершие оформляло собой деревянную или костяную рукоять ножа или, с меньшей вероятностью, какого-либо жезла. Оно было изготовлено металлургами ананьинской КИО в I тысячелетии до н. э. и импортировано в тот же период на территорию дьяковской культуры Верхневолжья. Установлено, что исследованный предмет был изготовлен путем литья из бронзы с объемной долей олова от 1,2 до 2,6% в разных частях изделия. Содержание олова может указывать на искусственный характер легирования сплава. Обнаружено довольно глубокое проникновение коррозии — куприта  $\text{Cu}_2\text{O}$  — в толщу исследуемого объекта. Объем куприта не превышает 8–10% от общего объема изделия, что указывает на хорошую сохранность исследуемого бронзового объекта.

**Благодарности.** Авторы публикации выражают благодарность сотрудникам Музея Дубны за предоставленный материал для исследований. Также авторы выражают особую признательность Сапрыкиной Ирине Анатольевне (Институт археологии РАН) за полезное обсуждение результатов работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moropoulou A., Labropoulos K. C., Delegou E. T., Karoglou M., Bakolas A.* Non-Destructive Techniques as a Tool for the Protection of Built Cultural Heritage // *Constr. Build. Mater.* 2013. V. 48. P. 1222–1239.
2. *Cesareo R., Castellano A., Buccolieri G., Quarta S., Marabelli M., Santopadre P., Ioele M., Gigante G. E., Ridolfi S.* From Giotto to De Chirico: Analysis of Paintings with Portable EDXRF Equipment // *Cultura Heritage Conservation and Environmental Impact Assessment by Non-Destructive Testing and Micro-Analysis* / Eds.: Van Grieken & Janssens. 2005. P. 183–196.
3. *Kardjilov N., Giulia F.* Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage. Berlin; Heidelberg: Springer Intern. Publ., 2017. 1st ed. P. 3–171.
4. *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. // *Рос. археология.* 2018. № 3. С. 36–42.
5. *Abramson M. G., Saprykina I. A., Kichanov S. E., Kozlenko D. P., Nazarov K. M.* A Study of the Chemical Composition of the 3rd Century AD Bosphoran Billon Staters by XRF-Analysis, Neutron Tomography and Diffraction // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2018. V. 12, No. 1. P. 114–117.
6. *Bakirov B. A., Kichanov S. E., Khramchenkova R. H., Belushkin A. V., Kozlenko D. P., Sitdikov A. G.* Studies of Coins of Medieval Volga Bulgaria by Neutron Diffraction and Tomography // *J. Surf. Invest.: X-Ray Synchrotron Neutron Tech.* 2020. V. 14, No. 2. P. 376–381.
7. *Abdurakhimov B., Kichanov S. E., Talmaçhi C., Kozlenko D. P., Talmaçhi G., Belozerova N. M., Balasoiu M., Belc M.* Studies of Ancient Pottery Fragments from Dobrudja Region of Romania Using Neutron Diffraction, Tomography and Raman Spectroscopy // *J. Archaeol. Sci.: Rep.* 2021. No. 35. P. 219–220.
8. *Mednikova M. B., Saprykina I. A., Kichanov S. E., Kozlenko D. P.* 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. V. 6. P. 45.
9. *Shvetsov V.* Pulsed Fast Reactor IBR-2 after Modernization // *J. Surf. Invest.: X-Ray, Synchrotron Neutron Tech.* 2020. V. 14, No. 1. P. 213–217.
10. *Kozlenko D. P., Kichanov S. E., Lukin E. V., Rutkauskas A. V., Bokuchava G. D., Savenko B. N., Pakhnevich A. V., Rozanov A. Yu.* Neutron Radiography Facility at IBR-2 High Flux Pulsed Reactor: First Results // *Phys. Procedia.* 2015. V. 69. P. 87–91.
11. *Kozlenko D. P., Kichanov S. E., Lukin E. V., Savenko B. N.* High-Pressure Neutron Diffraction Study of the Crystal and Magnetic Structure of Materials at the Pulsed Reactor IBR-2: Current Opportunities and Prospects // *Crystallogr. Rep.* 2021. V. 66, No. 2. P. 303–313.
12. *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 // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2020. V. 17, No. 6. P. 893–899.
13. *Петров Ф. Н., Зинин И. А.* Обследование городища Дубна // *Археологические открытия 2009 года.* М.: Ин-т археологии РАН, 2013. С. 120–122.
14. *Петров Ф. Н., Пантелеева Л. В.* Обследование территории г. Дубна в 2012–2013 гг. // *Археологические открытия 2010–2013 гг.* М.: Ин-т археологии РАН, 2015. С. 233–235.
15. *Успенская А. В.* Пекуновское селище и курганы // *Сов. археология.* 1971. № 1. С. 254–257.
16. *Бадер О. Н.* Древние городища на Верхней Волге // *Материалы и исследования по археологии Верхнего Поволжья.* М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. С. 90–132.

17. *Исланова И. В.* Вопросы изучения дьяковских древностей Верхневолжья и Валдая // Рос. археология. 2014. № 1. С. 14–19.
18. *Гуляев В. И.* Культ медведя у населения Восточной Европы в скифскую эпоху. М.: Ин-т археологии РАН, 2020. 248 с.
19. *Башенькин А. Н.* Вологодская область в древности и средневековье // Вологда: Краеведческий альманах. 1997. Вып. 2. С. 5–35.
20. *Васильев С. А.* Ананьинский звериный стиль. Истоки, основные компоненты и развитие // Археол. вести. 2004. Т. 11. С. 275–297.
21. *Корепанов К. И.* Изображение медведя в искусстве Прикамья второй половины I тысячелетия до н. э. // Вопр. археологии Урала. Свердловск, 1981. Т. 15. С. 130–136.
22. *Петрухин В. Я.* Мифы финно-угров. М.: Астрель, 2005. 463 с.
23. *Rodriguez-Carvajal J.* Recent Advances in Magnetic Structure Determination by Neutron Powder Diffraction // Phys. B: Condens. Matter. 1993. V. 192. P. 55–69.
24. *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. V. 13. P. 346–351.
25. *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 // Crystallogr. Rep. 2021. V. 66, No. 2. P. 254–266.
26. *Kardjilov N., Festa G.* Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage. Cham, Switzerland: Springer Intern. Publ., 2016. 350 p.
27. *Schneider C. A., Rasband W. S., Eliceiri K. W.* NIH Image to ImageJ: 25 Years of Image Analysis // Nat. Meth. 2012. V. 9. P. 671–675.
28. *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 // Adv. Struct. Chem. Imaging. 2017. V. 3. P. 1–9.
29. *Piccardo P., Mille B., Robbiola L.* Tin and Copper Oxides in Corroded Archaeological Bronzes // Corros. Metal. Herit. Artefacts. 2007. P. 239–262.
30. *Carley E. R.* The Corroded Bronze of Corinth // Proc. Am. Philos. Soc. 1941. V. 84, No. 5. P. 689–761.
31. *Chang T., Maltseva A., Volovitch P., Wallinder I. O., Leygraf C.* A Mechanistic Study of Stratified Patina Evolution on Sn-Bronze in Chloride-Rich Atmospheres // Corros. Sci. 2020. P. 108–477.
32. *Sidot E., Kahn-Harari A., Cesari E., Robbiola L.* The Lattice Parameter of  $\alpha$ -bronzes as a Function of Solute Content: Application to Archaeological Materials // Mater. Sci. Eng. A. 2005. V. 393. P. 147–156.
33. *Дегтярева А. Д., Кузьминых С. В.* Модели цветного металлопроизводства на Урале в раннем железном веке // Вестн. археологии, антропологии и этнографии. 2018. № 2(41). С. 41–60.
34. *Сыроватко А. С., Шишков В. А., Гольева А. А.* Новое поселение раннего железного века на Средней Оке и первые результаты химического анализа его коллекции // Археология Подмосковья: Материалы науч. семинара. М.: Ин-т археологии РАН, 2019. С. 15–20.
35. *Сапрыкина И. А., Кузьминых С. В., Пельгунова Л. А.* Исследование химического состава цветного металла Ананьинского могильника // Поволжская археология. 2016. Т. 1, № 15. С. 42–53.