

*С. Е. Кичанов, Д. П. Козленко, И. А. Сапрыкина, Е. В. Лукин,
А. В. Руткаускас, К. М. Назаров, Б. Н. Савенко*

Исследование археологических объектов методом нейтронной томографии

Всесторонние исследования объектов культурного наследия, уносящие нас в глубь веков и позволяющие проследить становление и развитие цивилизаций и этносов, являются одной из важнейших задач археологии и других гуманитарных наук. Особая ценность и уникальность таких объектов требует применения современных методов неразрушающего контроля для их исследований [1, 2]. Одним из методов, который дает подробную информацию о внутренней структуре исследуемых объектов, является нейтронная радиография и томография. Различие в полном сечении поглощения нейтронов для разных элементов позволяет визуализировать распределение неоднородностей состава или структуры в исследуемых объектах и материалах, получать их трехмерную модель для дальней-

шего анализа с пространственной точностью на уровне долей миллиметра [2, 3].

В этой статье представлены результаты исследования объектов культурного наследия, обнаруженных в составе тверского клада в 2014 г.: фрагментов широкого двусторчатого браслета и лучевого колта [4, 5]. С целью получения данных о внутреннем строении этих объектов были проведены исследования на специализированной экспериментальной станции нейтронной радиографии и томографии [6, 7] на 14-м канале импульсного высокопоточного реактора ИБР-2. Нейтронные радиографические изображения объектов получали с помощью детекторной системы на основе сцинтилляционного экрана ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ с регистрацией изображений высокочувствительной видеокамерой на основе CCD-матрицы. Для исследования внутренней

*S. E. Kichanov, D. P. Kozlenko, I. A. Saprykina, E. V. Lukin,
A. V. Rutkauskas, K. M. Nazarov, B. N. Savenko*

A Study of the Archeological Objects by Means of a Neutron Tomography Method

One of the most important tasks of archeology and other human sciences is comprehensive study of the cultural heritage items, which takes us into the deep past and allows understanding the formation and development of civilizations and ethnic groups. The special value and uniqueness of such items requires application of advanced nondestructive methods for their studies [1, 2]. One of such methods is neutron radiography and tomography which gives detailed information about the internal structure of the investigated objects. The difference in the total absorption cross sections of neutrons for different elements allows visualizing the distributions of composition or structural heterogeneities in the studied materials, ob-

taining a three-dimensional model with spatial resolution of a portion of a millimeter [2, 3].

In this paper, the results of the studies of cultural heritage items found in 2014 within the Tver treasure are discussed: fragments of two-leaved bracelet and the pendant [4, 5]. In order to obtain information about the internal structure of those cultural heritage items, neutron tomography experiments have been performed. These studies were prepared at the neutron radiography and tomography facility [6, 7] on beamline 14 of the IBR-2 high-flux pulsed reactor. The neutron radiography images of the investigated objects were collected by the detector system based on ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ scintillator screen with a high-sensitivity camera based on CCD chip. For the studies of

структуры археологических объектов был проведен ряд нейтронных радиографических экспериментов, результатом которых был набор из 360 угловых проекций исследуемых предметов. Из полученного набора радиографических проекций были восстановлены трехмерные модели объектов для последующего анализа [8]. Полученные трехмерные модели представляют собой массив данных из трехмерных пикселей — вокселей, каждый из которых характеризуется пространственными координатами и определенной величиной градации серого цвета, отражающего степень ослабления нейтронного пучка в определенной точке исследуемого образца. Виртуальная трехмерная модель исследуемого объекта, полученная после томографического восстановления из отдельных нейтронных проекций, позволяет детально визуализировать внутреннюю структуру исследуемых объектов, включая участки сборки отдельных деталей и внутренние элементы крепежа конструкции.

На рис. 1 слева представлен фрагмент лучевого колта. Виртуальная трехмерная модель исследуемого объекта, полученная после томографического восстановления из отдельных нейтронных проекций, приве-

дена на рис. 1 справа. После анализа трехмерной модели установлено, что в качестве основного крепежного элемента использовался высокий обруч с отогнутыми наружу краями, к которым крепились элементы орнаментальной розетки центрального медальона с лучом. Жесткость конструкции обеспечивает проволока, пущенная по всему внешнему периметру обруча.

Второй объект исследования — фрагмент широкого двустворчатого браслета, который до начала реставрационных работ представлял собой плохо сохранившуюся плоскость между арками (рис. 2 слева). В результате экспериментов по нейтронной томографии удалось получить данные о наличии золочения и размещении этих участков на арках и рифленых проволоках. Кроме того, удалось выявить участки позолоты и чернения на плоскости этого браслета (рис. 2 справа). Судя по полученным нейтронным данным, исследуемый фрагмент широкого двустворчатого браслета выполнен в технической и стилистической манере, характерной для первой киевской мастерской [9, 10], что ставит тверской клад в один ряд с другими уникальными и богатейшими по составу кладами домонгольского времени.

Рис. 1. Слева: исследуемый фрагмент лучевого колта. Высота фрагмента 5 см. Справа: восстановленная из данных нейтронной томографии трехмерная модель фрагмента колта. Отчетливо видны участки крепежного обруча, узоры и рифление на лучах колта, опорная проволока

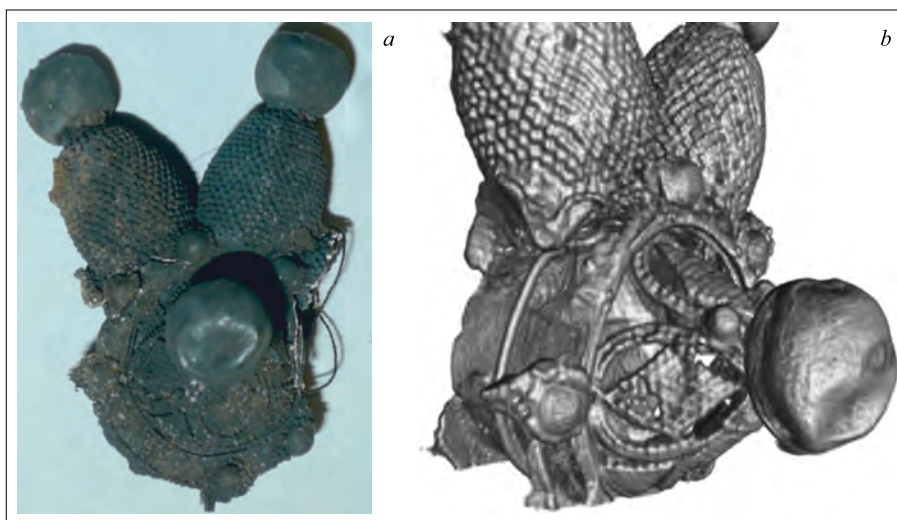


Fig. 1. *a*) A fragment of a “kolt” — a pendant ornament. The height of the fragment is 5 cm. *b*) A three-dimensional model of the fragment of the pendant reconstructed from the neutron tomography data. The mounting ring, grooving and patterns on the rays and a supporting wire are visible

the internal structure of the archeological items, a series of neutron radiography experiments were prepared. A three-dimensional model of the object for subsequent analysis was reconstructed from the set of angular radiographic projections [8]. The obtained three-dimensional model is

a three-dimensional array of 3D pixels — voxels, each characterized by spatial coordinates and a grayscale value that reflected the degree of neutron beam attenuation at a certain point of the sample. The virtual three-dimensional model of the object obtained after tomographic reconstruc-

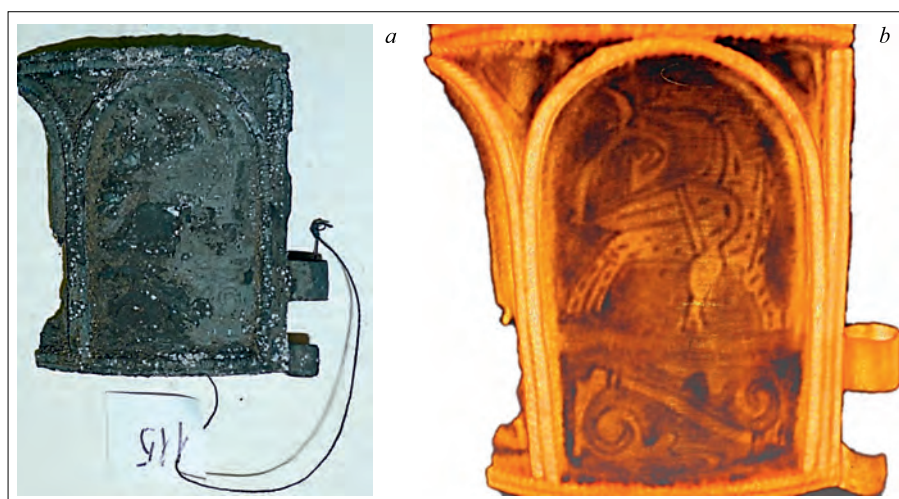


Рис. 2. Слева: исследуемый фрагмент браслета. Высота 6 см. Видно, что браслет покрыт коррозией и окалиной; Справа: восстановленная на основе данных нейтронной томографии трехмерная модель фрагмента браслета. Видны участки золочения и их размещения на арках и рифленых проволоках браслета. Представлены восстановленные из нейтронной томографии узорные участки позолоты и чернения на плоскости этого браслета

Fig. 2. *a)* A fragment of the bracelet under study. The height is 6 cm. The bracelet is covered with corrosion and slag. *b)* The three-dimensional model of a fragment of the bracelet reconstructed from the neutron tomography data. Gilding areas and their placing on the arches and grooving wires of the bracelet are visible. The gilding and blackening patterns recovered from neutron tomography data are distinguished on the plane of the bracelet

tion from the individual neutron radiographic images allows visualizing the internal structure of the objects, including the assembly of individual parts or internal structure of fastener elements.

A fragment of the radial pendant is shown in Fig. 1, *a*. The virtual three-dimensional model of the object obtained after tomographic reconstruction from the individual neutron radiography projections is presented in Fig. 1, *b*. The analysis of the three-dimensional model revealed that the thick ring with edges bent outside was used as a main fastening element. The ornamental elements of the central medallion and the radial shafts were attached to the ring. The wire around the outer perimeter of the ring provides the rigidity of the pendant structure.

The second studied item is a fragment of a wide two-leaved bracelet, which was a poorly preserved plane between the wired arches before the restoration (Fig. 2, *a*). Neutron tomography experiments provided data about gilding areas placed on the arches and grooving wires. In addition, it was possible to identify a gilding and blackening tracery on the plane of the bracelet (Fig. 2, *b*). According to the observed neutron data, the studied fragment of the two-leaved bracelet was made in the technique and style of the first Kiev workshop which elevates the Tver treasure to the rank of other unique and composition-rich treasures dating of the pre-Mongol period [9, 10].

Список литературы / References

1. *Janssens K., Van Grieken R.* Non-Destructive Micro Analysis of Cultural Heritage Materials. 1st ed. Imprint: Elsevier Sci., 2005. P. 828.
2. *Neutron Imaging and Applications: A Reference for the Imaging Community* / Ed. by I.S. Anderson, R.L. McGreevy, H. Z. Bilheux. New York: Springer, 2009. P. 341.
3. *Mannes D., Schmid F., Frey J., Schmidt-Ott K., Lehmann E.* Combined Neutron and X-Ray Imaging for Non-Invasive Investigations of Cultural Heritage Objects // *Phys. Procedia*. 2015. V. 69. P. 653.
4. *Хохлов А.Н., Кунгурцева С.А.* Тверской клад 2014 года. (предварительная публикация) / Отв. ред. А.Н.Хохлов // Тверь, Тверская земля и сопредельные территории в эпоху Средневековья. Вып.9. Тверь, 2016. С. 113–123;
5. *Khokhlov A.N., Kungurtceva S.A.* Tver Treasure 2014 (pre-publication) / Ed. A.N. Khokhlov // *Tver, Tver Region and Neighbouring Territories in the Middle Ages*. V.9. Tver, 2016. P. 113–123 (in Russian).
6. *Корзухина Г.Ф.* Киевские ювелиры накануне монгольского завоевания // *Сов. археология*. 1950. № 14. С. 217–244;
7. *Korzukhina G.V.* Kiev Jewelers on the Eve of the Mongol Invasion // *Sov. Arkheologiya*. 1950. No. 14. P. 217–244 (in Russian).
8. *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.

7. *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. Lett.* 2016. V.13. P.346.

8. *Chen R.C., Dreossi D., Mancini L., Menk R., Rigon L., Xiao T.Q., Longo R.* PITRE: Software for Phase-Sensitive X-Ray Image Processing and Tomography Reconstruction // *J. Synchrotron Radiat.* 2012. V.19. P.836–845.

9. *Макарова Т.И.* Чернь в драгоценном уборе Древней Руси // *Жилина Н.В., Макарова Т.И.* Древнерусский драгоценный убор — сплав влияний и традиций. IX–XIII вв.: Художественные стили и ремесленные школы. М.: ИА РАН, 2008. С.62–98;

Makarova T.I. The Blacking in the Precious Headdress of Ancient Russia // *Zilina N.V., Makarova T.I.* The Old-Russian Precious Headdress — Fusion of Influences and Traditions. IX–XIII Centuries: Artistic Styles and Craft Schools. М.: IA RAS, 2008. P.62–98 (in Russian).

10. Клады Древней Руси в собрании Русского музея. Альманах. Вып.457. СПб.: Palace Editions, 2015. 95 с.;

Treasures of Ancient Russia in the Russian Museum Collection. Almanac. Iss.457. St. Petersburg.: Palace Editions, 2015. 95 p. (in Russian).