

«Нейтронный неразрушающий структурный анализ объектов культурного наследия: прикладные междисциплинарные исследования»

Авторский коллектив:

Сергей Кичанов¹, Ирина Сапрыкина^{1,2}, Денис Козленко¹, Евгений Лукин¹, Куаныш Назаров¹, Вероника Смирнова¹, Бехзоджон Абдурахимов¹, Аяжан Жомартова¹, Булат Бакиров¹, Борис Савенко¹

¹ – Лаборатория нейтронной физики ОИЯИ,

² – Институт археологии РАН

[Цикл работ](#) состоит из 19 статей.

Всесторонние исследования объектов культурного наследия, уносящие нас вглубь веков и позволяющие проследить становление и развитие цивилизаций и этносов, являются одной из важнейших задач междисциплинарных исследований на стыке естественных наук, археологии и других гуманитарных наук. Общемировым трендом последних лет является широкое применение естественно-научных методов, включая ядерно-физические, к анализу внутреннего строения и различных характеристик археологических объектов. Это позволяет получить максимально полную информацию о химическом составе и структурных особенностях, наличии внутренних дефектов и скрытых конструкций или внутреннем декоре древних изделий, фазового состава и пространственного распределения компонентов уникальных объектов культурного наследия, имеющих высокую научную и историческую ценность, неразрушающими методами исследований.

В Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединенного института ядерных исследований реализован комплексный подход неразрушающего структурного анализа объектов культурного наследия, который включает в себя применение методов нейтронной радиографии и томографии, нейтронной и рентгеновской дифракции, а также рамановской спектроскопии. Глубокая проникающая способность нейтронов в вещество, высокий контраст нейтронных методов к водородосодержащим материалам позволяют получать принципиально новую научную информацию о внутреннем строении и фазовом составе объектов, зачастую недоступную при использовании других методов, а неразрушающий характер исследований обеспечивает исключительно бережное отношение к уникальным объектам исследования, имеющим высокую культурно-историческую ценность [1-19]. Для этих прикладных исследований разработаны новые подходы анализа трехмерных данных нейтронной томографии [1-3, 5, 7, 9, 10, 13, 14, 16, 18], выявлены определенные структурные маркеры для древних технологических процессов производства керамических изделий [8, 9, 13, 19], чеканки монет [1, 4, 6, 15] или приемов литья [17, 18] металлических предметов.

В цикле работ ярко продемонстрированы возможности методов нейтронной радиографии и томографии и их роль в идентификации древних технологических приемов изготовления объектов культурного наследия определенных исторических и культурных периодов. Так, с помощью нейтронных методов удалось выявить характер исполнения орнаментальных мотивов и участков нанесения позолоты или чернения для древних ювелирных изделий [2, 3, 5, 7, 10, 14-16], восстановить внутренние конструкционные особенности [2, 3, 5] и крепежа створчатого браслета из «Тверского клада 2014 г.», золотого флакона [2, 5] знатной сарматской женщины, культового серебряного сосуда [10] из раскопок античного храма Деметры и Коры, золотой амулетницы [14] из раскопок древнего поселения в Крыму. Восстановленные из данных нейтронной томографии трехмерные модели древнерусских

крестов-энколпионов и ювелирных украшений [2, 3, 5, 7, 10, 14-16] позволили разделить металлические и коррозионные фазы на поверхности и в объеме этих объектов культурного наследия и в итоге получить уникальную информацию о скрытых конструктивных особенностях, выявить фрагменты внутреннего содержания, смоделировать проникновения коррозии в объем металлических изделий.

Важные результаты получены в исследованиях фрагментов изделий древних гончарных мастерских. Представлены результаты структурных исследований фрагментов керамики [9] из византийской крепости в районе Добруджа (Румыния) и древних поселений южного Казахстана [13, 19]. Следует отметить и исследования фрагментов древнеримской мозаики [8] из города Констанца (Румыния). Результаты структурных исследований позволили восстановить технологии производства керамических предметов [9, 13, 19], температурные условия отжига [13] изделий, местоположения источников сырья.

Детальные исследования физико-химических свойств древних монет [1, 4, 6, 12, 15] являются одним из важных направлений в неразрушающем контроле объектов культурного наследия. Нумизматический материал хранит ценную информацию о торгово-экономическом и социальном развитии древних цивилизаций и государств, а с другой стороны, монеты являются удобными модельными объектами для исследования процессов коррозии и трещинообразования, протекающих в медных или бронзовых, серебряных или золотых археологических находках. В цикле работ приводятся результаты детальных нейтронных исследований нумизматического материала Боспорского царства [4, 12, 15], а также бронзовых и серебряных дирхем древней Булгарии [1, 6]. Фазовый состав монет и геометрия поверхностных слоев патины позволила выдвинуть предположения как о местоположении древних рудных источников, так и о монетных дворах [4, 6], особенностях чеканки [4, 12, 15] монет в давние времена. Особенности структурных характеристик внутренних пор в объеме фрагментов чугунных казанов [18] средневекового периода Золотой Орды напрямую указывают на специфику литья чугуна и позволяют восстановить не только информацию о технологии процесса, но и соотнести чугунные изделия с различными литейными мастерскими этого древнего государства. В цикл работ также вошли результаты уникальных исследований медного боевого топора, происходящего с территории Мало-Кизильского селища древнейшей абашевской культуры (около 3000 лет до н.э.). Анализ структурных данных [7, 11] и характер травм на черепах жителей поселения позволяет предположить о способах и приемах использования этого топора при межплеменных конфликтах.

Новые возможности, достигнутые с помощью применения нейтронного неразрушающего анализа объектов культурного наследия, оказались широко востребованными археологическим сообществом ряда стран-участниц ОИЯИ. Они сыграли ключевую роль при решении важных археологических задач, упомянутых выше, что было затруднительно сделать с использованием других альтернативных подходов.

Основные результаты проведенных междисциплинарных исследований опубликованы как в ведущих специализированных археологических журналах, включая *Applied Sciences*, *Journal of Archaeological Science: Reports*, *ArcheoSciences*, *Stratum plus*, «Российская археология», «Краткие сообщения Института археологии», так и в журналах естественнонаучной направленности: «Кристаллография», «Поверхность», *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, *Journal of Imaging*.

Список работ цикла:

1. Kichanov S.E., Nazarov K.M., Kozlenko D.P., Saprykina I.A., Lukin E.V., Savenko B.N. "Analysis of the internal structure of ancient copper coins by neutron tomography", *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 11(3), pp. 585-589 (2017). <https://doi.org/10.1134/S1027451017030296>
2. Kichanov S.E., Saprykina I.A., Kozlenko D.P., Nazarov K., Lukin E.V., Rutkauskas A.V., Savenko B.N. "Studies of Ancient Russian Cultural Objects Using the Neutron Tomography Method", *Journal of Imaging*, 4(2), pp. 25-34 (2018). <https://doi.org/10.3390/jimaging4020025>
3. 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*, 3, с. 36-42 (2018). <https://doi.org/10.31857/S086960630001631-3>
4. 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 Bosporan Billon Staters by XRF-Analysis, Neutron Tomography and Diffraction", *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 12, pp. 114-117 (2018). <https://doi.org/10.1134/S1027451018010202>
5. Saprykina I.A., Kichanov S.E., Kozlenko D.P. "Possibilities, Limitations, and Prospects of Using Neutron Tomography and Radiography for Preservation of Archaeological Heritage Objects" *Crystallography Reports*, 64, 1, 177-180 (2019) Сапрыкина И.А., Кичанов С.Е., Козленко Д.П. «Возможности, ограничения и перспективы нейтронной томографии в сфере сохранения объектов археологического наследия», *Кристаллография*, 64, №1, с.152-155 (2019). <https://doi.org/10.1134/S106377451901022X>
6. Bakirov B.A., Kichanov S.E., Khamchenkova R. Kh., Belushkin A.V., Kozlenko D.P., Sitdikov A.G. "Studies of Coins of Medieval Volga Bulgaria by Neutron Diffraction and Tomography", *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 14(2), pp. 376-381 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1027451020020433>
7. 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", *Journal of Imaging*, 6(6), pp. 45-54 (2020). <https://doi.org/10.3390/jimaging6060045>
8. Ion R.M., Bakirov B.A., Kichanov S.E., Kozlenko D.P. and et al, "Non-Destructive and Micro-Invasive Techniques for Characterizing the Ancient Roman Mosaic Fragments", *Applied Sciences*, 10(11), 3781 (2020). <https://doi.org/10.3390/app10113781>
9. Abdurakhimov B.A., Kichanov S.E., Talmatchi C., Kozlenko D.P., Talmatchi G., Belozerova N.M., Bălășoiu M., Belc M.C. "Studies of ancient pottery fragments from Dobrudja region of Romania using neutron diffraction, tomography and Raman spectroscopy", *Journal of Archaeological Science: Reports*, 35, 102755 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102755>
10. Zavoikin A.A., Saprykina I.A., Pelgunova L.A, Kichanov S.E., Kozlenko D.P. "Silver jar from the bosporan sanctuary of Demeter and Kore: results of neutron tomography and XRF investigations", *ArcheoSciences*, 45-2 (2), pp. 55-67 (2021). <https://doi.org/10.4000/archeosciences.10397>
11. Кузьминых С. В., Сапрыкина И. А., Кичанов С. Е., Медникова М. Б. «Комплексное изучение боевого топора абашевской культуры из Мало-Кизильского селища», *Краткие сообщения Института археологии*, 262, с. 44-57 (2021). <https://doi.org/10.25681/IARAS.0130-262>
12. Bakirov B.A., Saprykina I.A., Kichanov S.E., Mimokhod R.A., Sudarev N.I., Kozlenko D.P. "Phase Composition and Its Spatial Distribution in Antique Copper Coins: Neutron Tomography

and Diffraction Studies”, *Journal of Imaging*, 7, pp. 129-139 (2021).

<https://doi.org/10.3390/jimaging7080129>

13. Bakirov B.A., Zhomartova A.Zh., Kichanov S.E., Zhumatayev R.S., Toleubayev A.T., Nazarov K.M., Kozlenko D.P., Nazarova A.M. “Non-destructive neutron structural studies of ancient ceramic fragments of the cultural heritage of the Republic of Kazakhstan”, *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 6(1), 56-70 (2022).

<https://doi.org/10.32523/ejpfm.2022060106>

14. Сапрыкина И.А., Хайрединова Э.А., Кичанов С.Е., Руткаускас А.В., Белозёрова Н.М., Козленко Д.П. «Золотые амулетницы и их содержимое из раскопок могильника римского времени Фронтное-3», *Stratum Plus Journal. Archaeology and Cultural Anthropology*, 4, с. 167-181 (2022). <https://doi.org/10.55086/sp22467181>

15. 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”, *Краткие сообщения Института археологии*, 268, с. 100-113 (2022). <http://doi.org/10.25681/IARAS.0130-2620.268.100-112>

16. Smirnova V.S., Kichanov S.E., Petrov F.N., Panteleeva L.V., Bakirov B.A., Kozlenko D.P. “Structural Studies of a Bronze Zoomorphic Pommel from the Pekunovsky Settlement Using Neutron Diffraction and Tomography Methods”, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, 19, pp. 434–439 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1547477122040185>

17. Zhomartova A.Z., Shaykhutdinova E.F., Bakirov B.A., Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Sitdikov A.G. “Structural studies of the brass ingots from the Shcherbet historical complex of the Lower Kama region: neutron diffraction and tomography studies”, *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 6(3), pp. 180-189 (2022). <https://doi.org/10.32523/ejpfm.2022060303>

18. Bakirov B.A., Smirnova V.S., Kichanov S.E., Shaykhutdinova E.A., Murashev M.S., Kozlenko D.P., Sitdikov A.A., “Structural Features of the Fragments from Cast Iron Cauldrons of the Medieval Golden Horde: Neutron Tomography Data” *Journal of Imaging*. 9(5):97 (2023). <https://doi.org/10.3390/jimaging9050097>

19. Zhomartova A.Z., Bakirov B.A., Kichanov S.E., Zhumatayev R.S., Toleubayev A.T., Shakenov S., Kozlenko D.P., “Non-destructive structural studies of ceramic fragments of ancient tribes of Kazakhstan”, *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*, 7 (2), 79-90 (2023), DOI:10.32523/ejpfm.2023070201