

КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
В ГУМАНИТАРНЫХ НАУКАХ

УДК 904, 539.1.06

ВОЗМОЖНОСТИ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕЙТРОННОЙ  
ТОМОГРАФИИ И РАДИОГРАФИИ В СФЕРЕ СОХРАНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ  
АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ

© 2019 г. И. А. Сапрыкина<sup>1,\*</sup>, С. Е. Кичанов<sup>2</sup>, Д. П. Козленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт археологии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

\* E-mail: dolmen200@mail.ru

Поступила в редакцию 19.05.2017 г.

После доработки 10.10.2017 г.

Принята к публикации 18.10.2017 г.

Представлены результаты исследования серии объектов археологического наследия методом нейтронной томографии и радиографии (золотой сосудик, кресты-энколпионы, булатирий). Показано, что метод достоверно работает на образцах, изготовленных из цветных и драгоценных металлов. Исследования золотого миниатюрного сосудика с благовониями, датируемого I в. н.э., позволили получить важные данные о наличии внутреннего заполнения; для крестов были получены данные об отсутствии каких-либо «вложений» в эти своеобразные хранилища священных реликвий. Исследование древнерусского железного булатирия не дало результатов о наличии или отсутствии следов изображений под слоем коррозии на ее ударных площадках. Полученные данные являются основой для проведения дальнейших исторических интерпретаций, для выбора методов сохранения объектов археологического наследия, музейного экспонирования и презентации.

DOI: 10.1134/S0023476119010235

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений деятельности в сфере сохранения объектов археологического наследия, согласно действующему федеральному законодательству (№ 73-ФЗ от 25.06.2002 г. “Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации”; № 163-ФЗ от 27.06.2011 г. “О ратификации Европейской конвенции об охране археологического наследия (пересмотренной)”), являются сохранение физической целостности объектов археологии и определение степени их сохранности с целью определения дальнейших мероприятий по реставрации, реконструкции и исследованию.

В настоящее время в качестве мер, направленных на сохранение культурного наследия [1], понимаются преимущественно неразрушающие методы и подходы, обеспечивающие одновременно и физическую сохранность объекта исследования, и получение максимально полной информации о его химическом составе, наличии внутренних дефектов, структурных особенностей. Одним из таких методов является метод нейтронной томографии и радиографии, позволяющий визуализировать распределение неоднородностей состава или структуры в исследуемых объектах и

материалах и получать их виртуальную трехмерную модель для дальнейшего анализа [2, 3].

Активное применение метода нейтронной томографии и радиографии в сфере сохранения объектов культурного (археологического) наследия в последнее десятилетие можно связать с действием специально ориентированных программ таких организаций, как МАГАТЭ (проект “Ancient Charm”), Европейского Совета (проект “Autentico”), где решались вопросы высокотехнологичных структурных исследований объектов культурного наследия и определения их подлинности. Так, по этим программам были определены подлинники и подделки античного и римского времени, меровингской эпохи, хранящиеся в европейских музеях [2, 4, 5]. Метод нейтронной томографии и радиографии также хорошо зарекомендовал себя в исследованиях предметов более позднего времени, где он применялся для анализа сложных техник изготовления и для фиксации заполнений внутренних полостей объектов [6–9].

Для российских археологических исследований и работ в сфере сохранения объектов культурного наследия метод нейтронной томографии и радиографии все еще относится к числу редких. Тем интереснее для широкого круга исследовате-

лей может быть предлагаемая публикация результатов исследования методом нейтронной томографии и радиографии нескольких археологических объектов: средневековых крестов-энколпионов из раскопок в г. Тверь (раскопки А.Н. Хохлова); миниатюрного сосуда для благовоний из раскопок могильника сарматского времени Чеботарев-V (раскопки Р.А. Мимохода); древнерусского булатиря из раскопок в Великом Новгороде (раскопки П.Г. Гайдукова). Основной задачей анализа этих предметов неразрушающим методом исследования являлось получение изображений, скрытых под слоем коррозии (железный булатирий), и данных о конструктивных элементах и наличии заполнений внутренних объемов (золотой сосудик и кресты-энколпионы из сплавов на основе меди).

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Метод нейтронной радиографии заключается в получении нейтронных изображений исследуемых объектов. Функциональным развитием метода нейтронной радиографии является нейтронная томография. В этом методе выполняется объемная реконструкция внутреннего строения исследуемого объекта из набора отдельных радиографических проекций, полученных при различных угловых положениях образца относительно направления нейтронного пучка.

Исследование проводилось на специализированной экспериментальной станции нейтронной томографии и радиографии [10], на 14-м канале импульсного высокопоточного реактора ИБР-2 в Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка ОИЯИ. Из-за различной степени ослабления интенсивности нейтронного пучка [11] при прохождении через компоненты различного химического состава или плотности изучаемого объекта можно получить информацию о внутреннем строении исследуемых материалов с пространственным разрешением на микронном уровне [12].

Нейтронный пучок сечением  $20 \times 20$  см формируется системой коллиматоров, для которой значение характеристического параметра  $L/D$  [13] равнялось 200 ( $L$  — расстояние между входной апертурой коллиматорной системы установки и положением исследуемого образца;  $D$  — диаметр входной апертуры коллиматоров). Интегральный поток тепловых нейтронов в позиции образца составляет  $\Phi \sim 5.5(2) \times 10^6$  н/см<sup>2</sup>/с. Нейтронные радиографические изображения получали с помощью детекторной системы на основе скинтиляционного экрана <sup>6</sup>LiF/ZnS с регистрацией изображений высокочувствительной видеокамерой на основе CCD-матрицы (видеокамера VIDEOSCAN-11002-2001). Проведение томографических экспериментов обеспечивала система

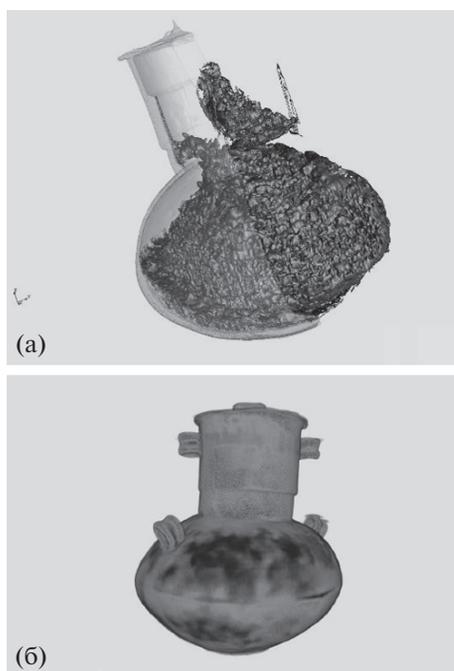
гониометров HUBER с минимальным угловым поворотом  $0.02^\circ$  (один гониометр поворотный и два наклонных). Полученные в эксперименте нейтронные изображения корректировались на фоновые шумы детекторной системы и были нормированы на интенсивность падающего нейтронного пучка с помощью программного пакета ImageJ [14]. Томографическая реконструкция из отдельных угловых нейтронных проекций осуществлялась программой H-PITRE [15]. Для визуализации и анализа получаемых трехмерных данных использовался программный комплекс VGStudio MAX 2.2 фирмы Volume Graphics (Heidelberg, Germany).

Для исследования внутренней структуры выбранных археологических объектов был проведен ряд нейтронных радиографических экспериментов, результатом которых стал набор из 360 угловых радиографических проекций. Время измерения одной проекции — 10 с, а полное время одного томографического эксперимента — около 4 ч. Из полученных наборов проекций восстановлена виртуальная трехмерная модель для каждого из исследуемых объектов [16]. Полученная модель представляет собой массив данных из трехмерных пикселей — вокселей, каждый из которых характеризуется пространственными координатами и определенной величиной градации серого цвета. Размер одного вокселя трехмерных данных составлял  $53 \times 53 \times 53$  мкм. Градация серого цвета соответствует степени ослабления нейтронного пучка в определенной пространственной точке образца.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование золотого *сосуда для благовоний*, датированного I в. н.э., показало наличие внутри него остатков вещества, занимающего 1/4 часть объема сосуда. Вещество представляет собой спекшуюся (“окаменевшую”) массу; по сохранившемуся объему можно предположить, что в момент помещения сосуда в погребение эта масса (благовония?) занимала значительную часть объема сосуда, что позволяет говорить о достаточно высоком социальном и экономическом статусе погребенного. Отмечается в целом однородный состав сохранившихся остатков вещества (рис. 1а); возможно, полученные данные будут полезны при проведении дальнейших исследований по определению химического состава остатков благовоний.

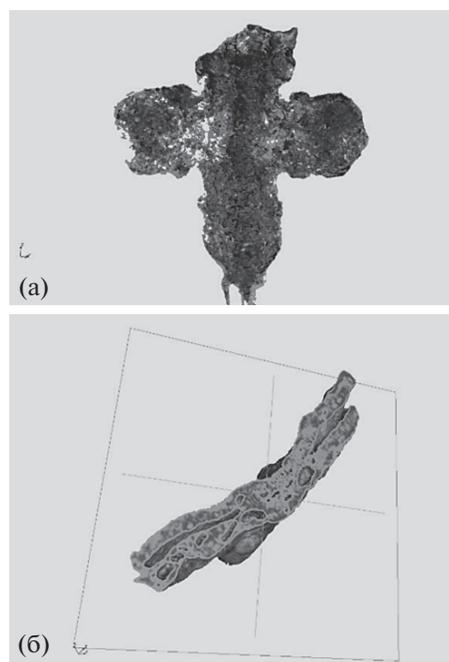
Кроме того, на восстановленной из томографических данных трехмерной модели хорошо видны отдельные детали и технологические приемы, с помощью которых собирался флакончик: тулово сосуда состоит из двух полусфер, соединенных друг с другом с помощью пайки, место стыка двух половинок тщательно “замазано” зо-



**Рис. 1.** Виртуальный разрез трехмерной модели золотого сосудика, восстановленной из данных нейтронной томографии. Темным цветом выделены остатки благовоний (а). Трехмерная модель сосудика с распределением поглощения нейтронов в его стенках. Наблюдается место соединения верхней и нижней части сосудика (б).

лотом так, что визуально этот участок не фиксируется; к тулову припаян цилиндр (горло сосуда) (рис. 1б). Крышка плотно подогнана к горловине флакончика, не оставляя никаких зазоров, что не позволяло маслам из состава благовоний быстро испаряться; толщина золотых листов, использованных при изготовлении сосудика, практически идентична. Все это говорит о высоком качестве изготовления изделия.

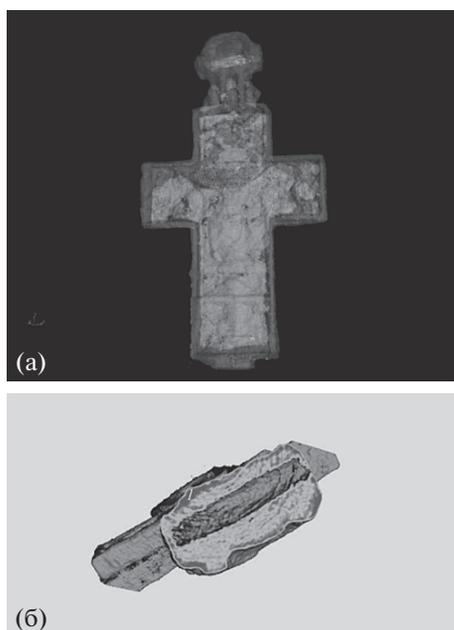
Исследования серии средневековых *крестов-энколпионов* (два предмета), изготовленных из цветных сплавов на основе меди, показали следующее. Кресты из выборки не имели внутренних заполнений (остатков “мошей” и иных “священных реликвий”) (или они не сохранились); как видно из предыдущего примера, применяемый метод хорошо фиксирует даже мелкие участки с сохранившимся заполнением внутренних объемов. Один из крестов имеет крайне плохую степень сохранности, и снаружи, и внутри он практически полностью коррозирован (рис. 2а). Благодаря томографии удалось определить, что этот крест также можно отнести к типу энколпионов (визуально это не определялось) — зафиксированы две створки, плотно подогнанные друг к другу (рис. 2б). В литых створках видны области пустот округлой формы: по всей видимости, это также является результатом процессов коррозии сплава.



**Рис. 2.** Трехмерная модель креста-энколпиона, восстановленная из данных нейтронной томографии. Представлены остатки металлической основы креста (а). Виртуальный срез трехмерной модели креста-энколпиона. Отчетливо видны места створок креста и внутренняя полость (б).

При исследовании другого креста-энколпиона было зафиксировано присутствие участков с внутренней коррозией сплава (на рисунке обозначено цифрой 1), область которой расположена довольно близко к поверхности (рис. 3). Хорошо видны также отдельные конструктивные элементы, например следы доработки литого рельефа креста.

Исследование древнерусского *булатиря* из кованого железа методом нейтронной томографии позволило довольно легко определить пространственное распределение коррозии на поверхности ручек и месте их крепления. Однако основная поставленная цель исследования оказалась не выполненной — под слоем коррозии, законсервированным в процессе реставрации, в области ударных площадок булатиря не удалось выявить следов изображения или надписей. Это обстоятельство связано с довольно толстым слоем металла, который должен пройти нейтронный пучок в этой области, что приводит к практически полному поглощению нейтронов. Такое сильное поглощение и вызвало затруднение в идентификации надписи на ударных площадках. С другой стороны, надписи могли не сохраниться или их могло не быть. В любом случае, проверка этих обстоятельств требует проведения дополнительных исследований с привлечением других методов исследования.



**Рис. 3.** Трехмерная модель креста-энколпиона, восстановленная из данных нейтронной томографии. Более светлые участки соответствуют внутренней полости креста (а). Виртуальный срез трехмерной модели застежки креста-энколпиона. Отчетливо видна полость для крепежного штифта, соединяющего обе створки (б).



**Рис. 4.** Трехмерная модель булатирия из кованого железа, восстановленная из данных нейтронной томографии. Видны повреждения на поверхности булатирия, внутренние элементы крепежа.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по методу нейтронной томографии и радиографии на объектах культурного (археологического) наследия показали, что метод достоверно работает на образцах, изготовленных из цветных и драгоценных металлов. Нейтронная томография и радиография позволяют получать качественные данные для тонкостенных образцов, образцов с разным количественным и каче-

ственным составом, с внутренними полостями и заполнениями. Полученные данные имеют большую значимость для проведения дальнейших исторических и естественнонаучных исследований, для выбора методов сохранения объектов археологического наследия, для музейного экспонирования и презентации.

В то же время нейтронные исследования археологических объектов, обладающих другими характеристиками (плотность, однородность материала), пока не дали ответов о пределах возможностей метода; скорее, здесь можно говорить о необходимости проведения повторных экспериментов и выработке других исследовательских подходов.

Авторы выражают благодарность П.Г. Гайдукову, Р.А. Мимоходу и А.Н. Хохлову за предоставленную возможность провести исследование предметов, найденных в ходе недавних раскопок экспедиций ИА РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный стандарт РФ. Сохранение объектов культурного наследия, ГОСТ Р 56891.1-2016; Р 56891.2-2016.
2. Kasztovszky Z., Belgya T., Kis Z., Szentmiklosi L. // Nuclear Techniques for Cultural Heritage Research. IAEA Radiation Technology Series № 2. Vienna, 2011. P. 121.
3. Kichanov S., Kozlenko D., Lukin E. et al. // Abstract Book of 8<sup>th</sup> International Topical Meeting on Neutron Radiography. Peking—Beijing, 2016. P. 43.
4. Lehmann E.H., Deschler-Erb E., Ford A. // Archaeometry. 2010. V. 52. № 2. P. 272.
5. Ryzewski K., Herringer S., Bilheux H. et al. // Physics Procedia. 2013. V. 43. P. 43.
6. Mannes D., Lehmann E., Masalles A. et al. // Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring. 2014. V. 56. P. 137.
7. Mannes D., Schmid F., Frey J. et al. // Physics Procedia. 2015. V. 69. P. 653.
8. Harvig L., Lynnerup N., Ebsen J.A. // Archaeometry. 2012. V. 54. P. 369.
9. Lehmann E.H., Hartmann S., Speidel M.O. // INV Archaeometry. 2010. V. 52. P. 416.
10. Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Lukin E.V. et al. // Physics Procedia. 2015. № 69. P. 87.
11. Searf V.F. // Neutron News. 1992. V. 3. № 3. P. 29.
12. Radiography of Cultural Material / Eds. Middleton A. et al. 2 edition. Routledge, 2005.
13. Dinca M., Pavelescu M. // Romanian J. Phys. 2006. V. 51. № 3–4. P. 363.
14. Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. // Nature Methods. 2012. № 9. P. 671.
15. Chen R.C., Dreossi D., Mancini L. et al. // J. Synchrotron Rad. 2012. V. 19. P. 836.
16. Lehmann E.H., Deschler-Erb E., Ford A. // Archaeometry. 2010. V. 52. № 2. P. 272.