

УДК 53.06

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

© 2021 г. К. М. Подурец^{1,*}, С. Е. Кичанов², В. П. Глазков¹, Е. С. Коваленко¹, М. М. Мурашев¹, Д. П. Козленко², Е. В. Лукин², Е. Б. Яцишина¹

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

² Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

*E-mail: Podurets_KM@nrcki.ru

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

После доработки 04.06.2020 г.

Принята к публикации 15.06.2020 г.

Представлен обзор основ, экспериментальных возможностей и приложений метода нейтронной радиографии и томографии в исследованиях структурных особенностей крупных объектов в различных областях. Рассмотрены основные принципы формирования нейтронных изображений. Приведены описания и основные параметры специализированных экспериментальных станций в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт” и в Объединенном институте ядерных исследований. Описаны экспериментальные возможности этих нейтронных установок, в том числе методические приемы по вариации нейтронного радиографического контраста с дисперсией по энергиям нейтронов. Представлен подробный обзор научных результатов, полученных на установках для нейтронной радиографии и томографии: исследование инженерных и технологических объектов, внутренней структуры метеоритов, палеонтологических образцов, объектов культурного наследия.

DOI: 10.31857/S0023476121020119

ОГЛАВЛЕНИЕ

- Введение
- 1. Основные понятия нейтронной радиографии и томографии
 - 1.1. Ослабление нейтронов в веществе
 - 1.2. Способы вариации контраста
 - 1.3. Пространственное разрешение в радиографии
- 2. Описание экспериментальных станций для нейтронной радиографии и томографии
 - 2.1. Установка для нейтронной радиографии и томографии на импульсном реакторе ИБР-2
 - 2.2. Установки для нейтронной радиографии и томографии на реакторе ИР-8
- 3. Краткий обзор научных направлений и основных экспериментальных результатов
 - 3.1. Энергодисперсионная нейтронная радиография
 - 3.2. Неразрушающий контроль инженерных объектов
 - 3.3. Исследования кинетических процессов в материалах в реальном времени

- 3.4. Исследования палеонтологических объектов
- 3.5. Исследования внутренней структуры метеоритов
- 3.6. Нейтронные исследования объектов культурного наследия
- 3.7. Нейтронные исследования доменной структуры железа
- Заключение

ВВЕДЕНИЕ

С помощью метода нейтронной радиографии, за счет разной степени ослабления интенсивности нейтронного пучка при прохождении через материалы различного химического состава, плотности и толщины компонентов изучаемого объекта, можно получить информацию о внутреннем строении исследуемых материалов с пространственным разрешением на микронном уровне [1–5]. Этот метод неразрушающего контроля характеризуется более глубоким проникновением в толщу исследуемого материала по сравнению с комплементарным методом рентгеновской радиографии и обладает преимуществами

при исследовании материалов, одновременно содержащих как легкие элементы (например, водород или литий), так и тяжелые, например железо [1–3, 6]. Радиография дает двумерную проекцию объекта, для получения трехмерного изображения используется метод томографии, где выполняется объемная реконструкция внутреннего строения исследуемого объекта из набора радиографических проекций, полученных при различных угловых положениях образца относительно направления пучка [2, 4, 7].

Методы нейтронной радиографии имеют довольно давнюю историю развития, начинающую отсчет с момента открытия нейтрона [8]. В 1935 г. Хартмут Кальманн и Эрнст Кун провели первый эксперимент по получению нейтронных изображений [9–11] с помощью радий-бериллиевого нейтронного источника. Публикации Кальманна [9, 11] и первые совместные с Куном патенты [10] обозначили многие из основных идей современных экспериментальных методов нейтронной радиографии. В ранних разработках нейтронных скинтилляторов принимал участие будущий нобелевский лауреат Клиффорд Шалл [12]. В конце 1970-х годов развитие методов детектирования нейтронов, а также коммерческой и научной фото- и видеотехники позволило разработать основы динамической нейтронной визуализации в реальном времени, названной нейтронным телевидением [13, 14]. Потребность в неразрушающем контроле ядерных топливных элементов вызвала всплеск развития нейтронных методов визуализации, в том числе метода автордиографии [15], при котором регистрируется изображение распределения радиоактивного элемента за счет собственного излучения этого элемента.

Методы рентгеновской радиографии и томографии, особенно в области медицинской диагностики, подстегнули развитие нейтронной томографии. В 80-х годах прошлого столетия были проведены первые эксперименты по нейтронной томографии с восстановлением трехмерной картины распределения внутренних компонентов в объемах массивных образцов [16]. Развитие исследовательских источников нейтронов, в том числе на основе ускорителей заряженных частиц (*spallation neutron source*), эволюция и оптимизация параметров выведенных нейтронных пучков, нейтронной оптики и элементов нейтронных детекторных систем наложили отпечаток и на развитие методов нейтронной радиографии и томографии [9, 17]. Эти методы, как представители семейства методов неразрушающего контроля, получили широкое распространение в научных прикладных исследованиях технологических и инженерных объектов [18]; в палеонтологии [19–21] и геофизике [22]; изучении источников электрического тока и батарей [23]; процессов, связанных с проникновением воды в толщу раз-

личных материалов [24]. А в последние годы наметился бурный рост публикаций по неразрушающим исследованиям объектов культурного наследия [25]. С учетом таких широких прикладных возможностей, а также в связи с появлением современных детекторов для получения нейтронных изображений на основе ПЗС (прибор с зарядовой связью) и КМОП (комплементарная структура металл–оксид–полупроводник) и созданием высокопоточных источников нейтронов, в настоящее время наблюдается высокая активность в развитии методов нейтронной радиографии и томографии и создании специализированных экспериментальных установок [26] в нейтронных центрах во всем мире. Ведутся работы по проектированию и созданию новых экспериментальных станций по нейтронной радиографии и томографии ODIN [27] на будущем европейском импульсном источнике нейтронов ESS (Лунд, Швеция) и VENUS [28] на нейтронном источнике SNS (Ок-Ридж, США).

В России работы по нейтронной радиографии на выведенных нейтронных пучках ядерных реакторов начали проводиться в середине прошлого столетия, однако в связи со спецификой работ информация о них труднодоступна. Например, в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова (впоследствии Национальный исследовательский центр (НИЦ) “Курчатовский институт”) существовала специализированная радиографическая установка на исследовательском реакторе ИР-8, также велись работы по применению малогабаритных реакторов для нужд нейтронной радиографии [29]. В Курчатовском институте были выполнены пионерские работы по нейтронной радиографии с фазовым контрастом [30, 31].

Первый в России нейтронный томограф был создан на реакторе Московского инженерно-физического института [32, 33]. На этой установке был использован детектор с электронно-оптическим преобразователем на основе микроканальной пластины для усиления сигнала. Пространственное разрешение прибора составляло около 70 мкм при поле зрения около 2 см [33]. Однако эти работы были остановлены после завершения работы реактора в МИФИ.

На исследовательском реакторе ИР-8 в НИЦ “Курчатовский институт” первая станция для нейтронной томографии была создана в 2013 г. на монохроматическом пучке трехосного спектрометра [34], но вскоре она была заменена на специализированную установку для нейтронной радиографии и томографии ДРАКОН [35]. В 2015 г. на импульсном высокопоточном реакторе ИБР-2 (Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)) была введена в эксплуатацию специализированная станция нейтронной радиографии и томографии NRT [36, 37]. Отметим, что им-

пульсный характер работы реактора ИБР-2 открывает перспективы для реализации энергодисперсионной нейтронной радиографии с помощью времяпролетной методики [38].

В настоящей работе представлено описание методических и экспериментальных возможностей экспериментальных установок для исследований с помощью метода нейтронной радиографии и томографии на исследовательском реакторе ИР-8 (НИЦ “Курчатовский институт”) и импульсном высокопоточном реакторе ИБР-2 (ОИЯИ), на которых реализуются нейтронные прикладные эксперименты по исследованию различных объектов. Представлен обзор основных научных и методических результатов, полученных на этих специализированных экспериментальных станциях.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ

1.1. Ослабление нейтронов в веществе

Метод нейтронной радиографии позволяет получить изображение внутреннего строения разнообразных объектов исследования. Получаемое нейтронное изображение представляет собой набор точек конечного размера или пикселей, отражающих степень ослабления интенсивности нейтронного пучка в конкретной точке исследуемого объекта [2, 4, 39]. Микроскопической величиной, описывающей взаимодействие проникающего излучения с веществом, является эффективное полное сечение σ_{tot} . С ним связаны макроскопические величины: μ – линейный коэффициент ослабления и μ/ρ – массовый коэффициент ослабления:

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma_{tot} N_A}{A}, \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества, N_A – число Авогадро, A – атомная масса вещества. Если для рентгеновского излучения характерна плавная зависимость коэффициента ослабления от атомного номера элемента (без учета краев поглощения), то для нейтронов эта зависимость имеет нерегулярный характер (рис. 1). Такое различие обусловлено разной природой взаимодействия нейтронов и рентгеновских лучей с веществом: рентгеновское излучение взаимодействует с электронной оболочкой атомов, а нейтроны – с ядром и магнитным моментом атома [4, 40].

Для вещества, содержащего i типов атомов, массовые коэффициенты ослабления для каждого типа складываются с весом, пропорциональным их массовой доле w_i :

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i w_i. \quad (2)$$

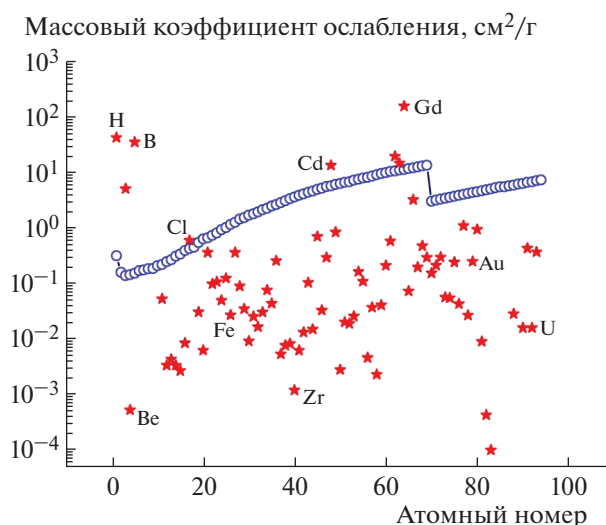


Рис. 1. Зависимость массового коэффициента ослабления μ/ρ для тепловых нейтронов (звездочки) и рентгеновских лучей с энергией 60 кэВ (кружки) от порядкового номера элемента.

Ослабление пучка, т.е. уменьшение его интенсивности после прохождения слоя толщиной t , подчиняется закону Бугера–Ламберта–Бера [2, 39]:

$$I = I_0 e^{-\mu t}, \quad (3)$$

где I – интенсивность пучка после объекта, I_0 – интенсивность падающего пучка. Для объемного трехмерного (3D) объекта

$$I(x, y) = I_0(x, y) \exp \left[- \int \mu(x, y, z) dz \right], \quad (4)$$

где x, y – координаты в плоскости детектора, z – координата вдоль направления пучка. Распределение интенсивности пучка, прошедшего через объект $I(x, y)$, является его радиограммой или нейтронной проекцией. Радиограмма содержит в себе интегральную информацию о распределении в объекте линейного коэффициента ослабления, однако для полного восстановления 3D-функции объекта $\mu(x, y, z)$ необходимо получение набора радиограмм, снятых при разных углах между направлением нейтронного пучка и положением образца. Возможность такого восстановления была показана Радоном еще в 1917 г. [41]. Существует несколько алгоритмов реализации такого восстановления [3, 4, 42, 43], наиболее известным и широко применяемым является алгоритм фильтрации и обратного проецирования (*filtered back-projection*). Он заключается в том, что каждая двумерная проекция “размывается” вдоль направления пучка, заполняя восстанавливаемый объем, поворачивается на угол, равный углу съемки, и затем все проекции складываются. Из геометрических соображений следует, что при такой процедуре изображение каждой точки в плос-

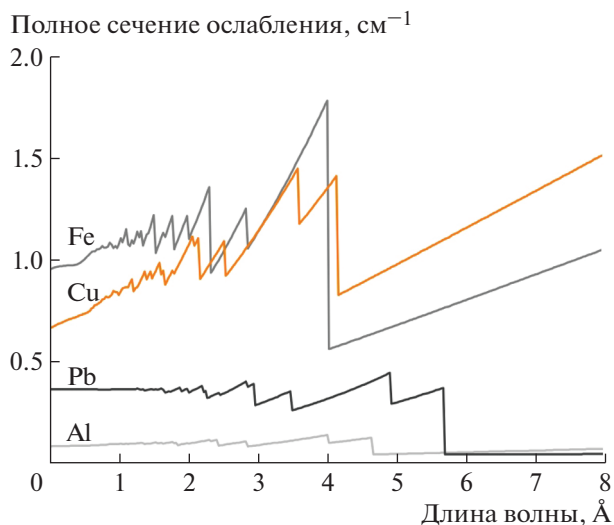


Рис. 2. Зависимости полного сечения ослабления для некоторых металлов от длины волны нейтронов.

кости, перпендикулярной оси вращения, превращается в функцию $1/r$, (где r — модуль радиус-вектора), и задачей фильтрации является разделение этой функции и функции, характеризующей объект. Математическим аппаратом, позволяющим выполнить фильтрацию, является фурье-преобразование, численно реализуемое как алгоритм быстрого преобразования Фурье. Для того чтобы восстановить функцию $\mu(x, y, z)$, в качестве проекций необходимо использовать логарифм приведенной интенсивности

$$P(x, y) = -\ln \frac{I(x, y)}{I_0(x, y)} \tag{5}$$

1.2. Способы вариации контраста

Основной характеристикой нейтронного изображения является контраст, т.е. относительная разница между яркостью изображений разных деталей объекта [1–4]. Контраст на нейтронной радиограмме определяется как разной толщиной деталей, так и разницей в линейном коэффициенте ослабления, или в полном сечении. Полное сечение σ_{tot} является суммой сечений, характеризующих все каналы взаимодействия нейтрона с веществом: поглощения, упругого и неупругого ядерного и магнитного рассеяния и др. Соответственно, все парциальные сечения этих взаимодействий могут быть использованы для формирования нейтронного контраста в экспериментах.

Одну из возможностей вариации контраста в нейтронной радиографии дает зависимость сечения упругого рассеяния от длины волны нейтронов [39]. Для кристаллического вещества при значе-

нии длины волны $\lambda > 2d_{hkl}$ дифракция на плоскостях hkl становится невозможной, и наблюдается скачок полного сечения, как правило, наиболее сильный для максимального d для данного вещества. Обычно такие скачки наблюдаются при длине волны от 4 до 5 Å (рис. 2). Отметим, что для быстрых нейтронов с энергией порядка электрон-вольт в энергетической зависимости имеются узкие резонансы в поглощении, которые могут быть использованы для создания контраста на нейтронных изображениях [39, 44].

В отсутствие существенной разницы полного сечения ослабления возможно использование контраста, связанного с изменением фазы волны нейтронов при прохождении исследуемого объекта [31, 45, 46]. Данный тип контраста возникает из-за преломления нейтронов на поверхностях раздела в исследуемом объекте. Преломление описывается известным из оптики законом Снеллиуса, который для малых угловых отклонений, характерных для тепловых нейтронов, имеет вид

$$\alpha = \Delta n \operatorname{ctg} \theta, \tag{6}$$

где α — угловое отклонение пучка, Δn — разность показателей преломления на границе раздела, θ — угол между пучком и поверхностью раздела. Показатель преломления

$$n = 1 - \lambda^2 \left(\frac{\sum N_i b_i}{2\pi} \pm \frac{m\mu_n B}{4\pi^2 \hbar^2} \right), \tag{7}$$

где N_i — число атомов i -го типа с амплитудой когерентного рассеяния b_i в единице объема, m и μ_n — масса и магнитный момент нейтрона, B — магнитная индукция. Отличие показателя преломления от единицы составляет величину порядка 10^{-6} , и в соответствии с (6) характерные углы преломления имеют порядок величины 1 угловой секунды. Для того чтобы на изображениях проявился фазовый контраст, необходимо, чтобы экспериментальная схема обладала угловым разрешением, соответствующим углам преломления. Таких схем известно несколько. Впервые нейтронная фазоконтрастная визуализация была осуществлена с помощью последовательного отражения пучка от двух совершенных кристаллов (рис. 3) [31, 47]. В этой схеме части пучка, испытавшие отклонение на угол, сравнимый с шириной кривой качания кристалла, отражаются анализатором с уменьшенной интенсивностью. Таким образом, на получаемом изображении хорошо видны поверхности раздела в объекте. Другие способы получения фазоконтрастных изображений основаны на интерференционных явлениях и поэтому требуют когерентности нейтронного пучка. Первый метод использует малый размер источника и значительное расстояние от источника до объекта [46]. При этом на некотором расстоянии от объекта по контуру объекта и

его деталей наблюдаются осцилляции интенсивности, создающие эффект выделения краев. Для тепловых нейтронов этот метод связан с большими потерями интенсивности и вряд ли может быть использован иначе чем в демонстрационных экспериментах. Другой метод, в настоящее время ставший наиболее распространенным, заключается в применении интерферометра Талбота—Лау, состоящего из трех решеток: первая повышает степень когерентности пучка, вторая создает периодическое волновое поле, в которое помещается объект, третья выявляет возмущение волнового поля, вызванное преломлением пучка в объекте [47]. Важным применением нейтронных методов фазового контраста в соответствии с (7) является наблюдение магнитных неоднородностей: доменов или кластеров [48–50].

Наличие у нейтрона магнитного момента предоставляет еще одну возможность для формирования контраста при визуализации: поляризованный пучок нейтронов при прохождении через магнитно неоднородную среду испытывает деполаризацию, и таким образом могут быть контрастированы области объекта, ее вызывающие [50].

1.3. Пространственное разрешение в радиографии

Основным технологическим достижением, обусловившим создание высокоэффективных установок для нейтронной радиографии и томографии, является разработка высокоразрешающих сцинтилляционных детекторов [51, 52]. В таких детекторах нейтронный пучок взаимодействует с люминофором или сцинтиллятором, состоящим, как правило, из смеси двух компонентов: поглотителя, испускающего при взаимодействии с нейтронами ионизирующие частицы, и оптического люминофора, испускающего под действием ионизирующего излучения видимый свет. Таким образом нейтронное изображение преобразуется в видимое изображение, которое с помощью волоконной оптики или линзового объектива передается на оптический сенсор — ПЗС- или КМОП-матрицу. Установка поворотного зеркала дает возможность защитить оптический сенсор и объектив от облучения нейтронами и сопутствующим гамма-излучением, тем самым предотвратить их радиационное повреждение и деградацию. Наиболее распространенным люминофором является ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$, характерное пространственное разрешение детекторов — 50–100 мкм, хотя разрешение ниже 10 мкм уже достигнуто [53].

Пространственное разрешение нейтронных радиографических установок определяется как разрешением детектора, так и коллимацией нейтронного пучка, которую принято характеризовать соотношением L/D [2, 5, 39, 54], где L — расстояние между входной апертурой коллиматорной систе-

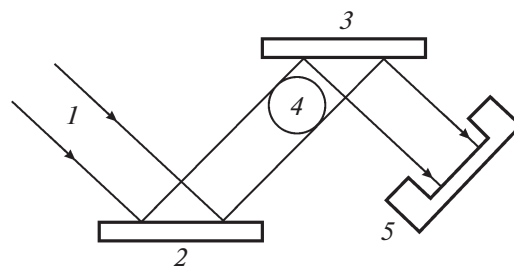


Рис. 3. Схема фазоконтрастной визуализации с помощью совершенных кристаллов: 1 — пучок нейтронов, 2 — кристалл-монокристалл, 3 — кристалл-анализатор, 4 — образец, 5 — детектор.

мы и положением исследуемого образца, а D — диаметр входной апертуры коллиматоров. Коллимационное размытие изображения зависит и от расстояния от образца до детектора l и равно $\delta \approx ID/L$. При использовании кристаллов-монокристаллов коллимация определяется также и мозаичностью кристаллов.

2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ НЕЙТРОННОЙ РАДИОГРАФИИ И ТОМОГРАФИИ

2.1. Установка для нейтронной радиографии и томографии на импульсном реакторе ИБР-2

Схема основных узлов экспериментальной установки NRT для нейтронной радиографии и томографии [36, 37] на 14-м канале импульсного высокопоточного реактора ИБР-2 представлена на рис. 4.

Нейтронный пучок формируется с помощью системы коллиматоров, состоящей из четырех кольцевых цилиндрических вставок, выполненных из борированного полиэтилена, чередующихся с дополнительными стальными кольцами для жесткости конструкции [36]. Внутренние диаметры кольцевых коллиматоров расширяются с 5 см на входе до 23.7 см на выходе нейтронного пучка из системы коллиматоров. В системе коллиматоров предусмотрено пространство для установки монокристаллических фильтров: сапфировых или висмутовых [55]. Эти фильтры предназначены для подавления быстрых нейтронов и гамма-излучения в спектре нейтронного пучка экспериментальной станции. Интегральный поток тепловых нейтронов в позиции образца измерялся методом активации золотых фольг и составляет $\Phi \sim 5.5(2) \times 10^6$ н/см²/с. Длина L составляет 10 м, а диаметр входного отверстия коллиматора D равен 5 см, что соответствует значению $L/D = 200$. Конструкция системы коллиматоров позволяет уменьшать диаметр входной апертуры до 0.5 см, что позволяет достигать значения $L/D = 2000$. Система коллиматоров поме-

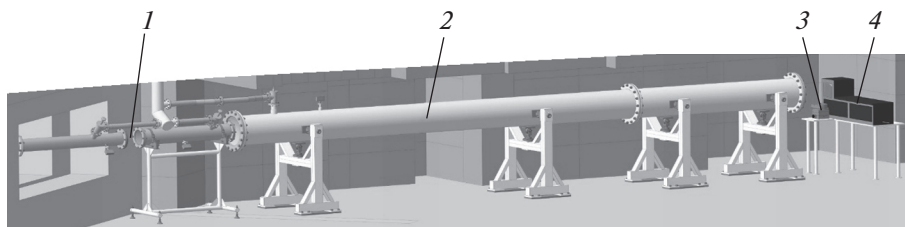


Рис. 4. Схема основных узлов установки NRT [36, 37] на реакторе ИБР-2: 1 – место расположения фильтров нейтронного пучка; 2 – вакуумированный кожух системы коллиматоров; 3 – система поворотных и наклонных гониометров для позиционирования исследуемого образца; 4 – детекторная система.

шена в вакуумированный кожух для уменьшения потерь в интенсивности из-за рассеяния нейтронов на воздухе.

Фотография детекторной системы на основе ПЗС-видеокамеры, используемой в экспериментальной установке для нейтронной радиографии и томографии, представлена на рис. 5. Конвертация нейтронов в световые фотоны, регистрируемые ПЗС-видеокамерой HAMAMATSU, происходит с помощью пластины сцинтиллятора ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}(\text{Ag})$ толщиной 0.2 мм производства фирмы RC TRITEC Ltd (Швейцария). Размер ПЗС-матрицы составляет 2048×2048 пикселей, каждый пиксель имеет размер 12×12 мкм. Для подавления фона рассеянных нейтронов от сцинтиллятора и конструктивных элементов детектора в детекторном модуле используется двухзеркальная схема. Световое изображение фокусируется на ПЗС-матрице объективом TAMRON с переменным фокусным расстоянием 70–300 мм. Все оптические системы детектора находятся в светозащитном кожухе. Размер одного пикселя

нейтронного радиографического изображения составляет 52×52 мкм, а пространственное разрешение изображений, регистрируемых при размере нейтронного пучка 20×20 см, – 134 мкм [37].

Проведение томографических экспериментов обеспечивает система гониометров HUBER с минимальным углом поворота до 0.02° и системой удаленного управления. Высокий поток нейтронов на исследуемом образце определяет короткое время экспозиции – от 10 с для регистрации одного изображения.

Полученные нейтронные изображения корректируются на фоновые шумы детекторной системы и нормализуются на падающий нейтронный пучок с помощью программного пакета ImageJ [56]. Томографическая реконструкция из набора угловых проекций исследуемых объектов осуществляется программным комплексом SYRMEP Tomo Project [57]. Для визуализации и анализа получаемых трехмерных данных используется программный комплекс VGStudio MAX 2.2.

2.2. Установки для нейтронной радиографии и томографии на реакторе ИР-8

На реакторе ИР-8 в НИЦ “Курчатовский институт” первый нейтронный томограф [34] был создан на монохроматическом пучке трехосного спектрометра. На приборе было достигнуто пространственное разрешение 160 мкм. В связи с возросшими потребностями в томографических исследованиях этот прибор был заменен на специализированную установку ДРАКОН [35].

Отличительной особенностью установки ДРАКОН является возможность изменения свойств пучка в зависимости от решаемой задачи. В приборе предусмотрена возможность выведения белого или фильтрованного пучка из реактора, однократно отраженного монохроматором на фиксированном угле с длиной волны около 1 Å или сформированного двойным монохроматором в диапазоне длины волны от 1.75 до 4 Å (рис. 6). Также возможно использование остаточного гамма-излучения от мишени, например медного кристалла. Параметр коллимации $L/D = 150$ при

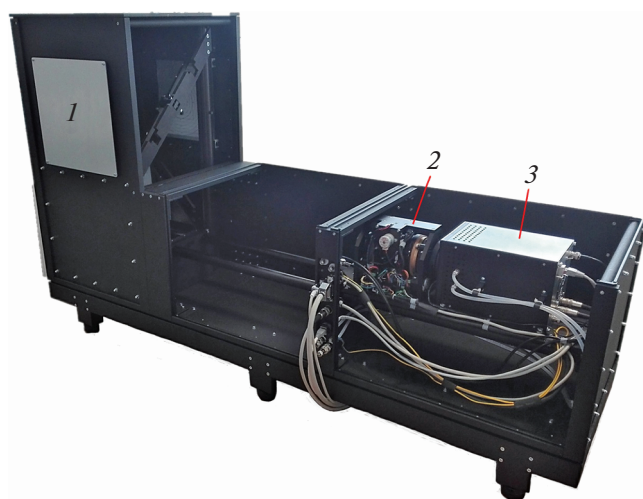


Рис. 5. Фотография детекторной системы установки NRT [37, 79]: 1 – нейтронный сцинтиллятор и блок поворотных зеркал; 2 – объектив с переменным фокусным расстоянием; 3 – ПЗС-камера.

длине $L = 6$ м и диаметре входного отверстия коллиматора $D = 4$ см. Размер пучка на образце составляет 7×7 см. Поток тепловых нейтронов в позиции образца измерялся методом активации золотых фольг и составляет $\Phi \sim 3.6 \times 10^6$ н/см²/с при длине волны нейтронного излучения $\lambda = 2.4$ Å. В двойном монохроматоре применяются кристаллы пиролитического графита с мозаичностью около 2° , при этом пространственное разрешение составляет 200 мкм, минимальное время экспозиции составляет 15 с.

Стол образца представляет собой силовой модуль для высокоточного перемещения исследуемого образца и детектора относительно пучка нейтронов. Количество управляемых перемещений и поворотов стола образца – 7, угловая точность гониометра (большого поворотного стола) $\pm 0.01^\circ$, диапазон перемещения по горизонтальной оси – 900 мм, по вертикальной оси – 160 мм, точность позиционирования ортогональных координат ± 0.02 мм.

В составе установки использованы различные типы детекторов нейтронов и гамма-излучения. Нейтронно- и гамма-чувствительные пластины Image Plate BAS-IP фирмы Fujifilm со считывателем (динамический диапазон 10^5) используются для радиографии. Для сильно ослабляющих объектов может быть использован детектор со стационарной Image Plate Mar345 (поле зрения диаметром 345 мм, размер пикселя 100×100 мкм, динамический диапазон 17 бит). В остальных случаях используются детекторы со сменными пластинами сцинтиллятора на основе ПЗС-камеры АПК-4000 с объективом Nikon 50мм f/1.2, размер сенсора 16.67×16.05 мм, матрица 2048×2048 пикселей, динамический диапазон 16 бит. Для томографической реконструкции внутренней структуры объектов используется пакет программ Ostorus Imaging Software.

В настоящее время создается томографическая установка на касательном канале реактора ИР-8. Для этого канала источником нейтронов служит бериллиевый отражатель, расположенный вблизи активной зоны реактора. Для проведения экспериментов используется белый спектр тепловых нейтронов. На этой установке возможно достичь пространственного разрешения около 50 мкм при поле зрения около 100×100 мм.

3. КРАТКИЙ ОБЗОР НАУЧНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ И ОСНОВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Энергодисперсионная нейтронная радиография

Как было указано в разд. 1.2, формирование нейтронного радиографического контраста возможно с помощью вариации длины волны падающих нейтронов или реализации метода энерго-

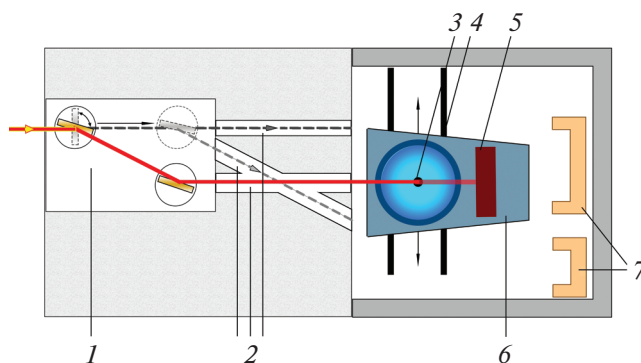


Рис. 6. Схема установки ДРАКОН на реакторе ИР-8 [35]: 1 – двойной монохроматор, 2 – коллиматоры, 3 – стол образца, 4 – направляющие для перемещения платформы, 5 – детектор, 6 – подвижная платформа, 7 – ловушки.

дисперсионной нейтронной радиографии [38]. В этом случае, выбирая определенный диапазон энергий нейтронов относительно брэгговских скачков при определенных длинах волн, можно усиливать радиографический контраст составляющих частей объекта из определенного материала для их более детального анализа [18, 58]. Изменение длины волны нейтронов и выделение определенного диапазона длин волн нейтронов из белого спектра возможно как с помощью механических или монокристаллических монохроматоров [5, 6], так и с помощью реализации времяпролетной методики [38].

Импульсный характер работы реактора ИБР-2 позволяет реализовать времяпролетную схему эксперимента [59]: в этом случае используются высокоскоростные видеокамеры или специальные детекторы [60] с синхронизацией времени начала экспозиции с импульсами реактора. В этом случае из белого нейтронного спектра можно выделить определенные энергетические диапазоны. При общей временной ширине нейтронного спектра 340 мс [59] и времяпролетной базе около 30 м можно выделить времяпролетный диапазон до 10 мкс, что соответствует минимальному диапазону по длинам волн $\Delta\lambda \sim 0.3$ Å. Первые результаты по энергодисперсионной радиографии на экспериментальной станции NRT описаны в [38].

На установке с кристаллическим монохроматором был проведен эксперимент на составном образце, состоящем из двух пластинок аустенитной и ферритной сталей одинакового размера, при изменении длины волны нейтронов наблюдается эффект обращения контраста (рис. 7). При длине волны $\lambda = 2.065$ Å два вида стали неразличимы, при $\lambda = 2.27$ Å пропускание аустенитной стали больше, чем ферритной, при $\lambda = 2.39$ Å – наоборот [35].

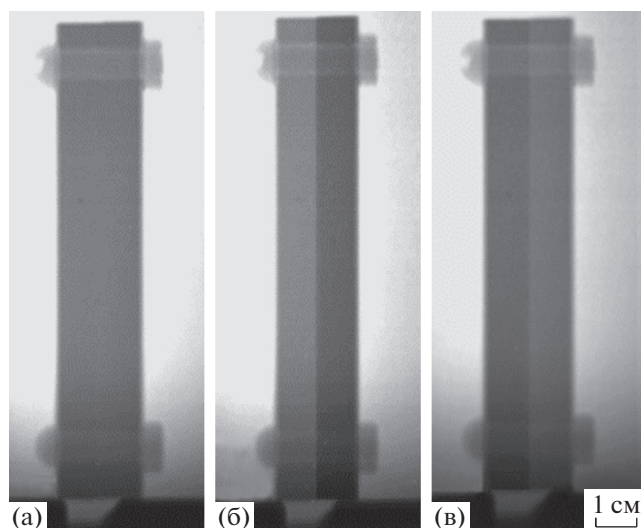


Рис. 7. Радиограммы модельного объекта из ферритной (справа) и аустенитной (слева) сталей при длине волны $\lambda = 2.065$ (а), 2.27 (б), 2.39 Å (в).

3.2. Неразрушающий контроль инженерных объектов

Метод нейтронной радиографии и томографии является прикладным методом неразрушающего контроля в современных технологиях. Проникновение нейтронов в толщу материала обеспечивает информацию о пространственном распределении внутренних компонентов, трещин и внутренних дефектов, мест и путей проникновения коррозии в промышленные и инженерные объекты.

В настоящее время аддитивные технологии являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений “цифрового” производства. Принцип заключается в том, что изделие создают, послойно добавляя материал различными способами, например наплавляя или напыляя металлический порошок, композитный или другой материал. Аддитивные технологии дополняют традиционные методы производства, основанные на удалении первичного материала (фрезерование, точение, строгание, шлифование). Аддитивные технологии позволяют “выращивать” сложные конструкции целиком (без швов), что позволяет уменьшить трудоемкость изготовления с одновременным уменьшением массы изделий. Развитие аддитивных технологий требует применения современных методов контроля, таких как нейтронная томография. На рис. 8 приведено томографическое сечение восстановленной 3D-модели для тестового образца, полученного методом селективного лазерного сплавления, имеющего сетчатую структуру. Отчетливо наблюдается дефект изготовления образца.

Метод нейтронной радиографии и томографии успешно применяется для исследования це-

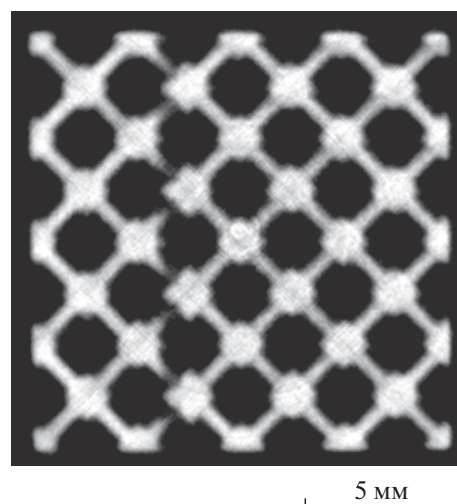


Рис. 8. Томографический срез с дефектом печати в тестовом образце, изготовленном методом селективного лазерного сплавления.

ментных материалов [61, 62]. Были исследованы разные типы строительных материалов, применяющихся при постройке специальных хранилищ или объектов для захоронений радиоактивных отходов различного типа [62]. Особое внимание уделялось исследованию таких дефектов в цементных и бетонных конструкциях, как трещины и полости, которые могут быть причиной проникновения радионуклидов из хранилища во внешнюю среду.

Также исследованы процессы, протекающие в цементных пастах при их затвердевании в присутствии алюминия [61]. Установлено, что высокая реактивность алюминия вызывает бурное выделение водородсодержащих компонентов из всего объема цементной пасты. Добавление органических компонентов к цементной пасте приводит к замедлению и подавлению упомянутых выше процессов, что открывает широкие возможности по использованию таких типов цементных образцов в качестве строительных материалов для постройки хранилищ или захоронений радиоактивных отходов, содержащих металлический алюминий.

Проведены эксперименты по изучению однородности мишеней, служащих для лазерного расплавления сверхпроводника YBCO при изготовлении сверхпроводящих проводов второго поколения. От однородности мишени зависит качество получаемых проводов. Мишени представляли собой прессованные диски 20–65 мм в диаметре. На томографических сечениях отчетливо выявляются неоднородности вещества [63].

3.3. Исследования кинетических процессов в материалах в реальном времени

Сравнительно короткие времена экспозиции (до нескольких секунд) для получения одного

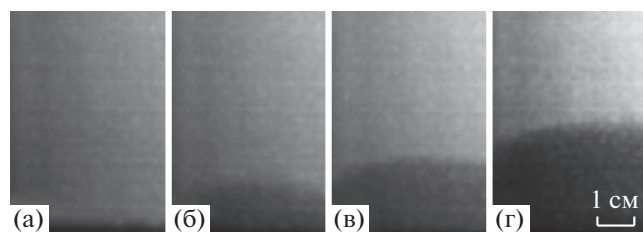


Рис. 9. Нейтронные радиографические изображения цементного образца с проникающей в него водой [62]: а – начало эксперимента, б – 120, в – 192, г – 260 мин с начала эксперимента. Более темные области соответствуют наличию воды в цементной матрице.

нейтронного изображения открывают широкие возможности метода нейтронной радиографии по исследованию процессов, протекающих в различных материалах. Одним из приложений нейтронной радиографии является исследование проникновения воды в различные материалы [2, 22].

Процессы поглощения воды различными типами цементных материалов [64] исследовались с помощью метода нейтронной радиографии на экспериментальной станции NRT. Через определенные моменты времени в процессе поглощения воды цементными образцами регистрировались нейтронные радиографические изображения этих объектов (рис. 9). По временной эволюции границы жидкость–материал были построены временные зависимости глубины про-

никновения воды и получены параметры пористости цементных материалов в рамках капиллярной модели распространения воды [65].

Другим интересным экспериментом являлось нейтронное радиографическое исследование процесса плавления смеси льда с кварцевыми гранулами [66]. Даже слабый нейтронный радиографический контраст между льдом и водой позволил разделить эти две фазы и получить основные параметры процесса плавления, такие как температура плавления или скорость протекания этого процесса. Установлено, что температура плавления водной смеси повышается на 3 К по сравнению с чистой водой в зависимости от размеров кварцевыми гранул. Этот результат объясняется структурной фрагментацией ледяного объема кварцевыми гранулами, что приводит к снижению общей теплопроводности смеси по сравнению с цельным куском льда.

3.4. Исследования палеонтологических объектов

Особенностью палеонтологических объектов является то, что в них в течение миллионов лет исходные биологические ткани были замещены на минеральные компоненты, состав которых может различаться в пределах одного объекта. Для прогнозирования результатов томографического исследования в [67–69] было проведено сравнение контраста между различными минералами и горными породами и построена шкала рентгеновской и нейтронной (рис. 10) контраст-

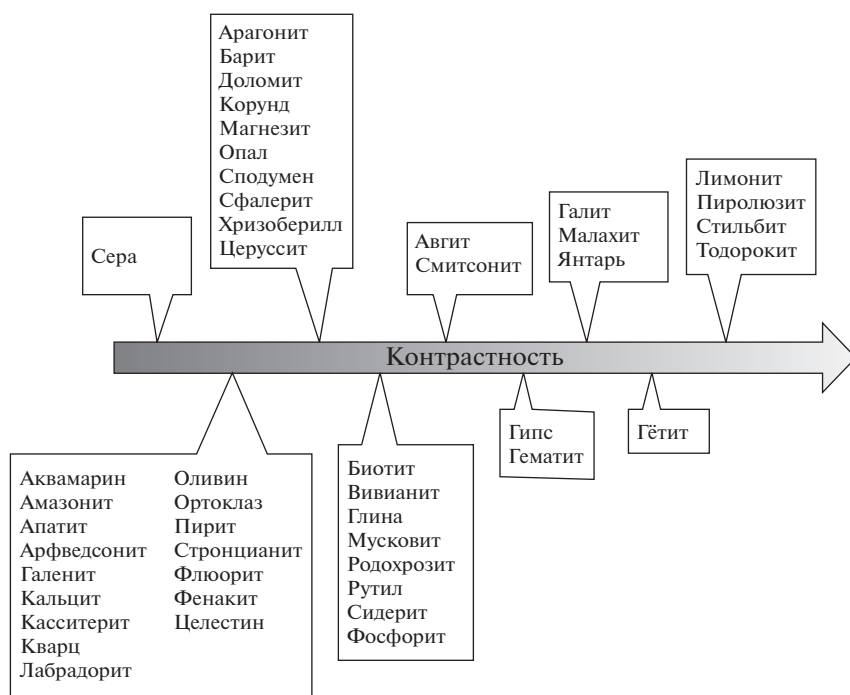


Рис. 10. Шкала контрастности минералов и горных пород для нейтронной томографии.

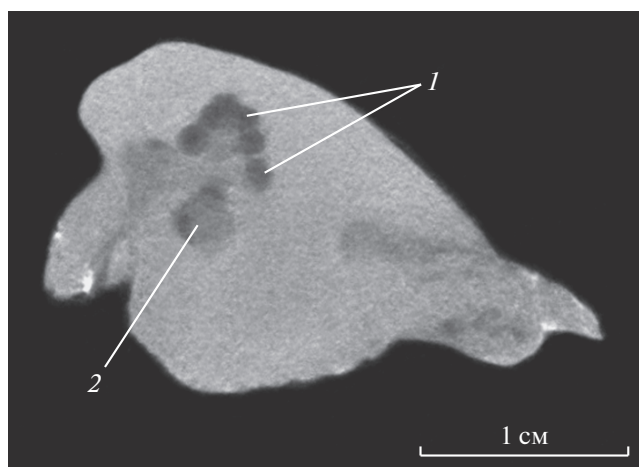


Рис. 11. Нейтронное томографическое сечение каменной кости *Vampalus sayanicus* (5341/4 ПИН, Чеченская республика, Сайсан, поздний миоцен): 1 – канал улитки, 2 – внутреннее слуховое отверстие [70].

ности. Эти шкалы позволяют сделать выбор излучения для конкретных объектов исследования.

С помощью нейтронной томографии на реакторе ИР-8 были проведены исследования каменных костей ископаемых китов [70]. Применение нейтронов было обусловлено заполнением полостей каменной кости веществом, сильно поглощающим рентгеновское излучение (рис. 11), благодаря чему изучено трехмерное строение внутреннего уха китов. Также с помощью нейтронной томографии исследована структура ископаемого китового уса [71]. В этом исследовании применение нейтронной томографии было обусловлено интересом к сохранности органических структур. Были показаны возможности изучения строматолитов с помощью нейтронной томографии [72].

3.5. Исследования внутренней структуры метеоритов

С прошлого века было разработано довольно большое количество теоретических моделей [73], описывающих формирование различных типов метеоритов. Фундаментальное различие в характере взаимодействия нейтронов с веществом по сравнению с рентгеновскими лучами делает нейтронную томографию привлекательным инструментом для исследований внутренней структуры метеоритов.

С помощью метода нейтронной томографии исследованы два метеорита разных типов: палласит Сеймчан [74] и хондрит Челябинск [75]. Отметим, что соответствующие коэффициенты

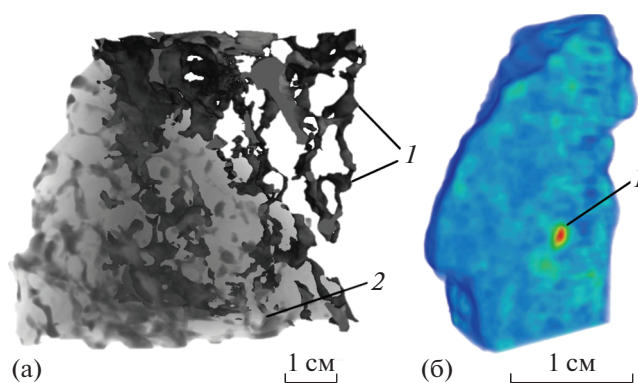


Рис. 12. Нейтронная томография метеоритов: а – 3D-модель фрагмента метеорита Сеймчан [74]: 1 – области, соответствующие металлическому компоненту метеорита, 2 – оливиновый минерал; б – виртуальный срез фрагмента Челябинского метеорита [75], где 1 – области, соответствующие металлическому камаситу.

ослабления нейтронов для железа и никеля в несколько раз больше соответствующих коэффициентов для минерала оливина, поэтому в экспериментах по нейтронной радиографии металлические вкрапления и жилы хорошо контрастируют на фоне зерен оливина (рис. 12). Различие коэффициентов ослабления нейтронов металлической и оливиновой компонентами позволило уточнить ряд петрологических и морфологических особенностей метеоритов. Нейтронная томография позволила обнаружить анизотропию распределения никеля внутри железной компоненты метеорита Сеймчан [74] и крупные зерна минерала камасита во внутреннем объеме исследованного фрагмента Челябинского метеорита [75].

3.6. Нейтронные исследования объектов культурного наследия

Исследования объектов культурного наследия с помощью естественно-научных методов важны для расширения и углубления их источниковедческих возможностей. Исследования позволяют определить место создания артефактов, пути их распространения, установить возраст, технологии изготовления, первоначальный облик и последующие изменения. Это позволяет получить новые данные о культуре, науке, ремеслах, технологиях, торговых связях, истории целых стран и народов [76, 77]. Особая ценность и зачастую хрупкость объектов культурного наследия требуют применения современных методов неразрушающего контроля для их исследований [78–81], как например метод нейтронной томографии и радиографии. Отметим, что особенностью объек-

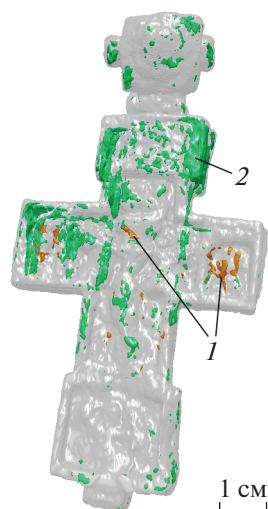


Рис. 13. Трехмерное представление креста-энколпиона [87], во внутренней полости регистрируются включения различной формы, 1 – вытянутые и нитевидные объекты длиной до 13 мм, 2 – неравномерная коррозия.

тов культурного наследия является то, что в них могут совмещаться материалы с разными физико-химическими свойствами: металлы, вещества минерального и органического происхождения, поэтому применение взаимодополняющих методов для их изучения весьма важно. Данные нейтронной визуализации могут быть дополнены рентгеновской визуализацией, а также исследованиями элементного и фазового состава веществ [81].

Примером нейтронно-томографического исследования является изучение монет Древней Греции [82, 83] и Булгарии [84], выполненное в ОИЯИ. Высокий радиографический контраст между серебром и медью позволяет успешно исследовать как пространственное распределение этих элементов, так и оценивать химический состав древних монет.

В НИЦ “Курчатовский институт” на реакторе ИР-8 в сочетании с визуализацией на синхротронном излучении были проведены комплексные исследования предметов личного благочестия домонгольского периода из находок Суздальской экспедиции Института археологии РАН, крестов-энколпионов (рис. 13) и подвески-иконки [85–88]. На основании нейтронной томографии были построены 3D-модели внутренних полостей закрытых крестов-энколпионов и до вскрытия крестов в них выделены участки, содержащие вложения. По итогам исследований натальной подвески-иконки с эмалевыми изображениями удалось восстановить технологию их со-

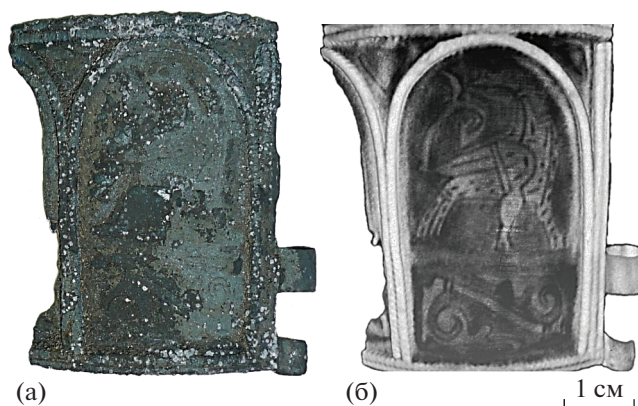


Рис. 14. Исследование фрагмента браслета [80]: а – фотография, б – восстановленная по нейтронной томографии 3D-модель фрагмента браслета. Виден восстановленный узор браслета.

здания. В данном случае вследствие разных свойств материалов, составляющих иконку, информация о строении объекта была получена из сопоставления нейтронных и синхротронных данных.

Важными для понимания уровня развития общества, его культурных связей являются объекты прикладного искусства. Одним из примеров является проведенное в ОИЯИ изучение фрагментов широкого двустворчатого браслета, обнаруженного в 2014 г. в составе Тверского клада XII века [89]. Фрагменты браслета покрыты коррозией и окалиной. Виртуальная 3D-модель исследуемого объекта, полученная после томографического восстановления из отдельных нейтронных проекций, позволяет визуализировать внутреннюю структуру исследуемых объектов, включая участки сборки деталей и внутренние элементы крепежа конструкции (рис. 14). По результатам нейтронной томографии восстановлен узор, скрытый под слоем коррозии. Судя по полученным нейтронным данным, исследуемый фрагмент широкого двустворчатого браслета выполнен в технической и стилистической манере, характерной для киевской мастерской, что ставит Тверской клад в один ряд с другими уникальными и богатейшими по составу кладами домонгольского времени.

Важное значение имеет также исследование естественно-научными методами музейных артефактов для их последующей реставрации. В НИЦ “Курчатовский институт” были исследованы бронзовые статуи “Иоанн креститель” работы Донателло и “Танцующий амур” из собрания Государственного музея изобразительных искусств им. А.С. Пушкина [90]. Статуи были сильно по-



Рис. 15. Фотография статуэтки “Танцующий амур” (а) и ее продольное томографическое сечение (б), на котором видно повреждение правой голени [90].

вреждены после пожара, поэтому перед началом реставрационных работ необходимо было провести их комплексное исследование, включающее в себя идентификацию использованных материалов, определение состава загрязнений, состояния поверхностей и внутренних частей статуй, обнаружение технологических элементов, а также скрытых дефектов, коррозии, трещин. Нейтронные радиографические и томографические исследования внутреннего строения статуй, обнаружения коррозии проводились на специализированной установке ДРАКОН на реакторе ИР-8. Нейтронная радиография показала в целом удовлетворительное состояние металла статуи “Иоанн Креститель”. Напротив, на нейтронных проекциях “Танцующего амура” обнаружили несколько участков с сильными повреждениями (рис. 15). Проведенное комплексное исследование дало возможность разработать оптимальную программу научной реставрации обеих статуй, включая технологии очистки поверхности, их консервации и дальнейшего экспонирования.

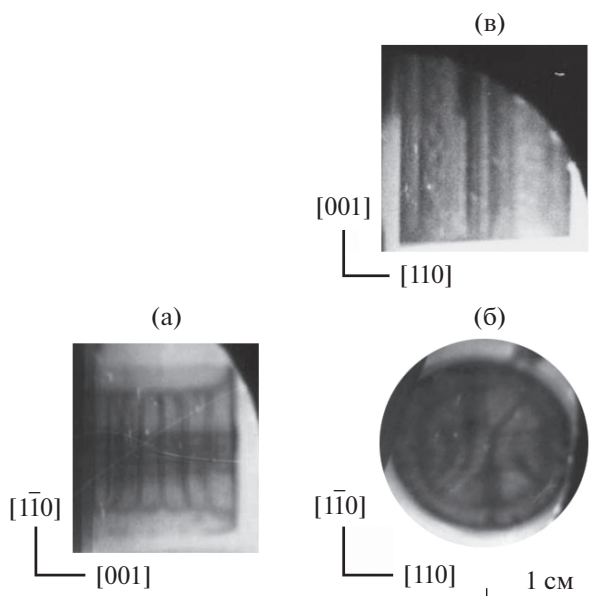


Рис. 16. Проекция доменной структуры монокристалла Fe–Si, снятые вдоль плоскостей {110} при горизонтальном (а), аксиальном (б) и вертикальном (в) положениях образца [91].

Полученная в ходе исследований углубленная информация о строении исследуемого объекта позволяет определить степень сохранности объекта, скрытые дефекты, уточнить технику работы мастера при создании артефакта, выработать оптимальные методы для реставрации. Это важно и для датировки произведения, уточнения авторства, определения подлинности артефакта.

3.7. Нейтронные исследования доменной структуры железа

С помощью метода нейтронной радиографии с рефракционным контрастом [31] впервые были получены изображения внутренней доменной структуры массивного (более 1 см во всех направлениях) монокристалла кремнистого железа [47]. С помощью таких изображений, полученных при разных ориентациях образца по отношению к пучку (рис. 16), восстановлен общий характер доменной структуры, построена схема замыкания магнитного потока в масштабах всего образца. Показано, что доменная структура строится аналогично известной структуре Ландау–Лифшица и состоит из приповерхностной и внутренней областей [91], в которых направления намагниченности взаимно перпендикулярны. Также было изучено изменение доменной структуры

при нагреве выше точки Кюри и намагничивании [92].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В обзоре представлено описание экспериментальных возможностей метода нейтронной радиографии и томографии, реализуемых на специализированных экспериментальных станциях на исследовательских реакторах ИР-8 (НИЦ “Курчатовский институт”, Москва) и импульсном высокопоточном реакторе ИБР-2 (ОИЯИ, Дубна). Параметры и техническое оснащение этих станций позволяют использовать различные методы вариации нейтронного радиографического контраста, в том числе визуализацию с дисперсией по энергиям нейтронов. Также в обзоре показана высокая информативность нейтронной визуализации при исследовании сложных инженерных объектов, метеоритов, палеонтологических образцов, объектов культурного наследия и других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюфяков Н.Д., Штань А.С. Основы нейтронной радиографии. М.: Атомиздат, 1975. 256 с.
2. Kardjilov N., Lehmann E., Strobl M. et al. // Neutron Imaging. 2017. V. 21. P. 329.
3. Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation / Ed. Meyers R.A. V. S1–S3. UK: John Wiley & Sons Ltd, 2009. 2188 p.
4. Neutron Imaging and Applications: A Reference for the Imaging Community / Eds. Anderson I.S. et al. US: Springer, 2009. 341 p.
5. Strobl M., Manke I., Kardjilov N. et al. // J. Phys. D. 2009. V. 42. P. 243001.
6. Kardjilov N., Manke I., Hilger A. et al. // Materials Today. 2011. V. 14. P. 248.
7. Schillinger B., Lehmann E., Vontobel P. // Phys. B: Condens. Matter. 2000. V. 276–278. P. 59.
8. Chadwick J. // Nature. 1932. V. 129. P. 312.
9. Brenizer J.S. // Physics Procedia 2013. V. 43. P. 10.
10. Kallmann H., Kuhn E. // United States Patent. 1940. V. 2. № 186. P. 757.
11. Kallmann H. // Research. 1948. V. 1. P. 250.
12. Wang S.P., Shull C.G., Phillips W.C. // Rev. Sci. Instrum. 1962. V. 33. № 1. P. 126.
13. Berger H. Neutron Radiography: Methods, Capabilities, and Applications. Amsterdam; New York: Elsevier Pub. Co, 1965. 146 p.
14. Berger H. // Mater. Eval. 1966. V. 24. P. 475.
15. Бабикова Ю.Ф., Гусаков А.А., Минаев В.М. и др. Аналитическая автордиография. М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
16. Neutron Radiography, Proceedings of the First World Conference / Eds. Barton J.P., Von Der Hardt P. San Diego CA: D. Reidel Publishing Company, 1983. 1090 p.
17. Von Der Hardt P., Röttger H. Principles and Practice of Neutron Radiography. Neutron Radiography Handbook, Holland: D. Reidel Publishing Company. 1981. 170 p.
18. Grünzweig C., Mannes D., Kaestner A. et al. // Physics Procedia. 2013. V. 43. P. 231.
19. Kardjilov N., Hilger A., Manke I. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 605. P. 13.
20. Laaß M., Schillinger B., Werneburg I. // Physics Procedia. 2017. V. 88. P. 100.
21. Калоян А.А., Коваленко Е.С., Пахневич А.В. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исследования. 2014. № 11. С. 5.
22. Kaestner A., Vontobel P., Lehman, E. Neutron Imaging Methods in Geoscience. Advances in Computed Tomography for Geomaterials. 2013. USA: John Wiley & Sons, Inc., 365 p.
23. Liu D.X., Wang J., Pan K. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2014. V. 53. P. 9498.
24. Perfect E., Cheng C.-L., Kang M. et al. // Earth Sci. Rev. 2014. V. 129. P. 120.
25. Neutron methods for archaeology and cultural heritage / Eds. Kardjilov N., Festa G. Springer International Publishing. 2017. 349 p.
26. Lehmann E.H. // J. Imaging. 2017. V. 3 (4). P. 52.
27. Strobl M. // Physics Procedia. 2015. V. 69. P. 18.
28. Bilheux H.Z., Herwig K.W., Keener S. et al. // Physics Procedia. 2015. V. 69. P. 55.
29. Khvostionov V.E., Yaskevich V.S. // Fourth World Conference on Neutron Radiography (WCNR-4). 1993. Gordon & Breach Publishers, P. 257.
30. Митрофанов Н.Л., Подурец К.М., Соменков В.А. и др. // АС 1402871 БИ 1988. 1988. № 22. С. 135.
31. Подурец К.М., Соменков В.А., Шильштейн С.Ш. // ЖТФ. 1989. Т. 58. № 6. С. 115.
32. Микеров В.И., Житник И.А., Игнатъев И.А. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1994. № 4. С. 96.
33. Микеров В.И. // Патент RU 2 502 986 С1. 2013.
34. Коваленко Е.С., Подурец К.М., Глазков В.П. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 5. С. 18.
35. Соменков В.А., Глазков В.П., Эм В.Т. и др. // Поверхность. Рентген., синхр. и нейтр. исследования. 2019. № 9. С. 93.
36. Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Lukin E.V. et al. // Physics Procedia. 2015. V. 69. P. 87.
37. Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Lukin E.V. et al. // Phys. Part. Nucl. Lett. 2016. V. 13. P. 346.
38. Lukin E.V., Kozlenko D.P., Kichanov S.E. et al. // Physics Procedia. 2015. V. 69. P. 271.

39. *Lehmann E.H., Frei G., Vontobel P. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603. P. 429–438.
40. *Гуревич И.И., Тарасов Л.В.* Физика нейтронов низких энергий. М.: Наука, 1965. 608 с.
41. *Radon J.* // Berichte Sachsische Akademie der Wissenschaften Leipzig, Math-Phys Kl. 1917. V. 29. P. 262.
42. *Nattere F.* The Mathematics of Computerized Tomography. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2001. 184 p.
43. *Kak A.C., Slaney M.* Principles of Computerized Tomographic Imaging. Society for Industrial and Applied Mathematics. 1987. 341 p.
44. Neutron Radiography / Eds. Barton J.P., von der Hardt P. Proceedings of the First World Conference San Diego, California, U.S.A. December 7–10. 1983. Dordrecht: Springer, 1090 p.
45. *Allman B.E., McMahon P.J., Nugent K.A. et al.* // Nature. 2000. V. 408. P. 158.
46. *Pfeiffer F., Grunzweig C., Bunk O. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. P. 215505.
47. *Podurets K.M., Somenkov V.A., Chistyakov R.R. et al.* // Physica B. 1989. V. 156. P. 694.
48. *Manke I., Kardjilov N., Schäfer R. et al.* // Physics Procedia. 2015. V. 69. P. 404.
49. *Kardjilov N., Manke I., Strobl M. et al.* // Nat. Phys. 2008. V. 4. P. 399.
50. *Подурец К.М., Петренко А.В., Соменков В.А. и др.* // ЖТФ. 1994. Т. 64. С. 200.
51. *Lehmann E.H., Tremsin A., Grunzweig C. et al.* // J. Instrumentation. 2011. V. 6. P. C01050.
52. *Lehmann E., Frei G., Kuhne G. et al.* // Nucl. Instrum. Methods A. 2007. V. 576. P. 389.
53. *Trtik P., Hovind J., Grünzweig Ch. et al.* // Physics Procedia. 2015. V. 69. P. 169.
54. Practical neutron radiography / Ed. Domanus J.C. Netherlands: Springer, 1992. 270 p.
55. *Руткаускас А.В., Козленко Д.П., Кичанов С.Е. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исследования. 2015. № 4. С. 5.
56. *Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W.* // Nat. Methods. 2012. V. 9. P. 671.
57. *Brun F., Massimi L., Fratini M. et al.* // Advanced Structural and Chemical Imaging. 2017. V. 3. P. 4.
58. *Shinohara T., Kai T., Oikawa K. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 746. P. 012007.
59. *Shvetsov V.N.* // Quantum Beam Sci. 2017. V. 1. P. 6.
60. *Tremsin A.S., Vallerga J.V., McPhate J.B. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2013. V. 60. P. 578.
61. *Kichanov S.E., Kenessarin M., Balasoiu M. et al.* // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2020. V. 17. P. 73.
62. *Kichanov S.E., Nazarov K.M., Kozlenko D.P. et al.* // Romanian Journal of Physics. 2019. V. 64. P. 803.
63. *Shavkin S.V., Shikov A.K., Chernykh I.A. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 507. P. 022030.
64. *El Abd A., Kichanov S.E., Taman M. et al.* // Appl. Radiat. Isot. 2020. V. 156. P. 108970.
65. *Zhao Y., Xue S., Han S. et al.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 124. P. 693.
66. *Kalvoda L., Kichanov S.E., Kučeráková M. et al.* // Journal of Cold Regions Engineering. 2019. V. 33. P. 04019003.
67. *Пахневич А.В.* // Матер. Междунар. минералогического семинара “Минералогические перспективы-2011”. 2011. С. 124.
68. *Пахневич А.В.* // Современная минералогия. Сборник трудов I Международной интернет-конференции. Казань, 5 февраля 2013. Казань. 2013. С. 27.
69. *Калоян А.А., Коваленко Е.С., Пахневич А.В. и др.* // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 11. С. 1805.
70. *Tarassenko K.K., Kovalenko E.S., Kaloyan A.A. et al.* // Paleontological Journal. 2018. V. 52. P. 106.
71. *Тарасенко К.К., Лопатин А.В., Пахневич А.В. и др.* // Докл. РАН. 2018. Т. 483. № 1. С. 222.
72. *Пахневич А.В., Зайцева Л.В., Самылина О.С. и др.* // Эволюция биосферы с древнейших времен до наших дней. К 85-летию Г.А. Заварзина / Ред. Мельников Л.М., Рожнов С.В. 2019. С. 106.
73. *Scott E.R.D.* // Geochim. Cosmochim. Acta. 1977. V. 41. P. 693.
74. *Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Lukin E.V. et al.* // Meteoritics & Planetary Science. 2018. V. 53. P. 2155.
75. *Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Kirillov A.K. et al.* // SN Applied Sciences. V. 12. P. 1563.
76. *Janssens K., Van Grieken R.* Non-Destructive Micro Analysis of Cultural Heritage Materials. 2005. Amsterdam: Elsevier, 828 p.
77. Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage / Eds. Kardjilov N., Festa G. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 350 p.
78. *Teixeira J., Magli R., Loupiac C.* // Eur. J. Mineral. 2015. V. 201527. P. 289.
79. *Kichanov S., Saprykina I., Kozlenko D. et al.* // J. Imaging. 2018. V. 4. P. 25.
80. *Сапрыкина И.А., Кичанов С.Е., Козленко Д.П.* // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 1. С. 152.
81. *Терещенко Е.Ю., Колобылина Н.Н., Коваленко Е.С. и др.* // В мире неразрушающего контроля. 2018. Т. 21. С. 17.
82. *Абрамзон М.Г., Сапрыкина И.А., Кичанов С.Е. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исследования. 2018. № 2. С. 24.
83. *Кичанов С.Е., Назаров К.М., Козленко Д.П. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исследования. 2017. № 6. С. 11.

84. *Бакиров Б.А., Кичанов С.Е., Храмченкова Р.Х. и др.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исследования. 2020. Т. 4. С. 69.
85. *Говор Л.И., Грешиников Э.А., Зайцева И.Е. и др.* // Краткие сообщения Института археологии. 2017. Вып. 249. С. 348.
86. *Коваленко Е.С., Подурец К.М., Грешиников Э.А. и др.* // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 5. С. 826.
87. *Макаров Н.А., Грешиников Э.А., Зайцева И.Е. и др.* // Краткие сообщения Института археологии. 2020. Т. 258. С. 25.
88. *Kovalenko E.S., Murashev M.M., Stolyarova E.K. et al.* // Crystallography Reports. 2020. V. 65. № 6. P. 1073.
89. *Сапрыкина И.А., Кичанов С.Е., Козленко Д.П. и др.* // Российская археология. 2018. № 3. С. 36.
90. *Глазков В.П., Коваленко Е.С., Мурашев М.М. и др.* // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 4. С. 670.
91. *Подурец К.М., Сокольский Д.В., Чистяков Р.Р. и др.* // ФТТ. 1991. Т. 33. № 10. С. 2954.
92. *Подурец К.М., Чистяков Р.Р., Шильштейн С.Ш.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. С. 134.