

УДК 539.26

## ИНТЕГРАЦИЯ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНОГО И ГУМАНИТАРНОГО ЗНАНИЯ В ИСТОРИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

© 2022 г. Е. Б. Яцишина<sup>1,\*</sup>, М. В. Ковальчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия*

*\*E-mail: Yatsishina\_EB@nrcki.ru*

Поступила в редакцию 08.04.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 19.04.2022 г.

Одной из доминирующих тенденций развития современной науки является интеграция естественно-научного и гуманитарного знаний. Исходя из того что один из основных типов источников, на которые опирается историческая наука, — вещественные, значение исследований материала этих источников крайне велико. Полученные в ходе исследований характеристики материалов артефактов, из которых они созданы, в соединении с различными методами исторического исследования значительно дополняют и повышают источниковедческий потенциал объектов культурного наследия. Схожим набором естественно-научных методов исследуются материалы и применительно к произведениям искусства, что в сочетании с искусствоведческим анализом дает возможность решить целый ряд задач научной реставрации.

DOI: 10.31857/S0023476122050137

### ВВЕДЕНИЕ

При помощи естественно-научных методов можно получить детальную информацию об элементном и фазовом составе материала, его структуре, происхождении, особенностях исследуемого объекта, наружных повреждениях или внутренних дефектах и других параметрах. Такие сведения дают возможность реконструировать процессы получения и обработки материала, нюансы технологий изготовления и дальнейшего бытования объекта. В сочетании со сравнительно-типологическим методом и данными письменных источников (если они имеются) такой комплементарный подход позволяет получить наиболее полную информацию об объектах культурного наследия различной природы и происхождения. Тем самым удается ввести в научный оборот новые исторические данные, повысить достоверность атрибуции исследуемых объектов, глубже интерпретировать связанный с ними исторический контекст.

Применяемые естественно-научные методы исследования объектов культурного наследия в большинстве своем не нарушают их целостности, но дают важную информацию о состоянии артефакта, выявляя, в том числе, невидимые глазу повреждения. Эти данные крайне важны для выбора оптимальных методик и способов реставрации, объективной атрибуции, экспонирования или консервации, определения наилучших условий

дальнейшего хранения объектов. Таким образом, наряду с историками и археологами во всестороннем изучении материала артефактов схожим комплексом естественно-научных методов заинтересованы и научные реставраторы, искусствоведы, музееведы.

Предлагается закрепить за этим направлением термин историческое материаловедение, как отражающий в полной мере его междисциплинарный характер, интеграцию естественной и гуманитарной составляющей и предполагающий широкую трактовку применительно как к археологии, так и к научной реставрации.

### ИНТЕГРАЦИЯ НАУК КАК ОТРАЖЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ НАУКИ

Одна из всеобщих закономерностей исторического развития науки состоит в том, что формирование новых направлений идет в диалектическом взаимодействии с возникновением интегрирующих областей. Вопросы взаимосвязи процессов дифференциации и интеграции в ходе развития науки рассматривали не только философы и историки науки [1], но и представители естественного блока [2, 3].

Например, В.И. Вернадский, будучи одним из крупнейших минералогов, кристаллографов, не только расширил границы своей деятельности на

почвоведение, химию, биохимию, геологию, заложив также основы радиогеологии, но и стал основателем такого междисциплинарного научного направления, как биогеохимия. В своем научном творчестве он также уделял значительное место истории науки, глубоко анализировал ее внутренние процессы. В основополагающем труде “Научная мысль как планетное явление” В.И. Вернадский объяснял процессы интеграции научных дисциплин, развивающиеся в этот период, тем, что проблемы научного знания “все чаще не укладываются в рамки отдельной, определенной, сложившейся науки. (...) вышедшие за пределы одной науки, неизбежно создают новые области знания, новые науки, все увеличивающиеся в числе и в скорости своего появления” [4].

Идеи междисциплинарности, распространявшиеся постепенно не только на естественно-научное, но и гуманитарное знание, В.И. Вернадский, которого можно назвать натурфилософом XX века, развил в своем учении о биосфере и позже — ноосфере, ставшем по своей сути новым естественно-философским мировоззрением [5].

В.И. Вернадский выделяет ведущую роль в ноосфере разума человека, его интеллекта, творческого начала. Все это невозможно без развития гуманитарной компоненты, или, как называет ее ученый, науки о “духовном творчестве человеческой личности в ее социальной обстановке” [5].

После Второй мировой войны в рамках атомного и космического проектов в период бурного развития вступили все естественные науки и связанные с ними технологии. Это привело к появлению и расширению сферы междисциплинарных исследований и технологий, таких как, например, кибернетика, генетика, робототехника, объединивших самые различные научные направления.

В 1960–1970-е годы процессы объединения, синтеза наук активизировались, развитие науки все более определялось потребностями в интеграции различных научных направлений и естественно-научного, и гуманитарного блоков. Особенно важным с прикладной точки зрения для объединения наук стало появление общих для разных дисциплин методов исследований. В последние десятилетия процессы интеграции охватили и сферу социогуманитарного знания, которое сегодня активно взаимодействует с естественно-научным через синтез идей и методов, обмен технологиями, формирование общих задач.

Одним из наиболее ярких примеров интеграции естественных и гуманитарных наук на современном этапе расширения междисциплинарности является изучение объектов культурного наследия естественно-научными методами — историческое материаловедение. Формирование этого междисциплинарного направления дли-

лось не одно десятилетие. По мере развития естественных наук расширялся спектр используемых для исследования объектов культурного наследия методов и инструментария: от первого фотоаппарата и микроскопа до источников синхротронного излучения и нейтронов. Однако неизменным оставался предмет исследования — материал объекта, изучение которого естественно-научными методами давало новую информацию для историков, археологов, искусствоведов.

#### ВОЗНИКНОВЕНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫХ МЕТОДОВ В АРХЕОЛОГИЮ И НАУЧНУЮ РЕСТАВРАЦИЮ В РОССИЙСКОЙ НАУКЕ

Археология — один из способов изучения истории человечества через вещественные памятники в широком смысле этого слова. В современной археологии четко прослеживается интеграция гуманитарной сферы через историю, музееведение с естественными науками и технологиями: от геологии и химии до ядерной физики и генетики. Всестороннее изучение объектов культурного наследия возможно только комплексно — и в гуманитарном аспекте, и с точки зрения их материальных свойств, которые исследуются естественно-научными методами.

За долгие годы археология прошла непростой путь в своем развитии, самоидентификации и определении основных целей и задач.

Термин археология возник в древней Греции и приписывается Платону. Древнеримский философ Тит Лукреций Кар — один из основоположников материалистического учения, в своем знаменитом трактате “О природе вещей” рассматривал историю развития человечества по эпохам, соответствующим материалу, из которого изготавливались орудия труда. Разделение Лукрецием древнейшей истории на каменный, медный, бронзовый и железный века, предложенное им еще в I веке до н.э., легло в основу современной периодизации дописьменной истории человечества [6].

Поначалу найденные древние артефакты воспринимались как диковинки, красивые вещи, которым иногда пытались вернуть их первоначальный облик. Мало кто задумывался об их исторической ценности, высокой значимости именно как материальных свидетелей прошлых веков. Однако увеличивающийся спрос на античные артефакты, их высокая стоимость стали побудительным мотивом для начала первых целенаправленных раскопок. С расширением археологических работ в начале XIX века и значительным увеличением количества найденных объектов культурного наследия начались единичные исследования материалов в составе обнаруженных

артефактов – керамики, металлов, пигментов. Самое первое документально подтвержденное химическое исследование состава нескольких греческих и римских монет проведено в Берлине в 1795 г. Мартином Генрихом Клапротом с помощью разработанного им гравиметрического анализа [7].

В России археология начала развиваться в XVIII веке, когда в русле петровских преобразований стали формироваться отечественная наука и образование. Необходимость систематизации и описания найденных археологических объектов в полной мере осознавал М.В. Ломоносов. В этом он был по сути дела пионером, ибо в его время археологии как самостоятельной науки еще не существовало. Согласно инструкции, составленной М.В. Ломоносовым, при проведении сбора сведений специальные экспедиции в разных областях России в числе прочих заданий должны были снимать планы и составлять описания “городов и знатных гор, или положений мест, примечания достойных” [8].

Во второй половине XVIII века Россия включается в орбиту формирующейся в Европе классической археологии, изучающей античные артефакты, тогда в основном еще с точки зрения искусствознания. Развитие классической археологии в России получает новый импульс с вхождением в состав империи Крыма с его богатейшим античным наследием.

После Отечественной войны 1812 г. в российском обществе наблюдается мощный всплеск патриотизма, национального самосознания, что оказывает влияние на все без исключения сферы жизни. История Отечества, национальная культура становятся крайне важной составляющей этих процессов. Это способствует возрождению интереса к “русской старине”, ее древним храмам, памятникам, развитию археологических изысканий не только в Крыму и Причерноморье, но и по всей стране.

Важным шагом для дальнейшего развития археологических работ в России, их систематизации, просветительской деятельности становится создание в 1846 г. в Санкт-Петербурге Археологическо-нумизматического общества (с 1866 г. – Русское археологическое общество), в котором были сформированы три отдела: русской и славянской археологии, восточной археологии, а также древней и западной археологии. По этим направлениям российская археология развивалась вплоть до начала XX века.

На протяжении XIX столетия в России открывались новые музеи, в которых широкая публика приобщалась к истории страны через объекты культурного наследия различного рода. Прежде всего следует упомянуть Государственный исторический музей, который по праву можно назвать

новаторским по своему подходу к освещению истории через материальные предметы различных эпох, начиная с первобытных стоянок на территории России и до XIX века.

С увеличением количества общедоступных музеев и ростом их коллекций все более важными становились вопросы реставрации артефактов различных эпох для их экспонирования. Это подразумевало целый комплекс работ, включающий в себя правильную очистку объекта, выявление повреждений, экспертизу подлинности и создание наиболее благоприятных условий для его сохранения и показа в музее.

В Европе в этот период уже развивались исследования объектов культурного наследия с помощью прежде всего химических методов, нацеленных на изучение состава красок и подбор оптимальных составов для очистки произведений искусства от загрязнений разного рода. Также очень востребованным в этом направлении оказалось, практически сразу после ее изобретения в 1827 г. Ж.Н. Ньепсом, свойство фотографии проникать сквозь верхние слои живописи. Крайне важным шагом для изучения внутренней структуры живописных произведений стало использование микроскопа. Новые методы позволяли углубленно изучать технологии, приемы, материалы, использовавшиеся живописцами прошлого, столь необходимые для проведения полноценной реставрации.

В России первопроходцем в применении естественно-научных методов в реставрации стал Эрмитаж, где уже в первой четверти XIX века была создана реставрационная мастерская с выделением “механической” и “художественной” части, также при ней основали школу. Именно здесь заложены первые традиции российской научной реставрации.

Императорская академия художеств – старейшее высшее художественное учреждение в России – в 1889 г. получила исключительное право на реставрацию древностей, найденных в ходе археологических раскопок на территории России [9]. В целом к середине XIX века в России были заложены основы научной реставрации. Однако, несмотря на растущий интерес к возможностям естественных наук, до их широкого, системного применения в реставрационной деятельности было еще далеко. Почти повсеместно превалировало так называемое поновление, т.е. восстановление предмета в виде, более или менее соответствующем представлениям о его первоначальном облике, а порой и вовсе ему не соответствующем [10].

Во второй половине XIX столетия в России началось бурное развитие естественных наук, что непосредственно повлияло и на формирование

нового направления в археологии. Речь идет о древнейшей истории человечества.

Развитие древнейшей археологии в России связано с именами российских биологов, геологов, зоологов второй половины XIX века. Для анализа своих археологических находок, прежде всего касающихся материальной культуры неолита и палеолита, все эти ученые активно использовали методы естественных наук.

Однако направление естественно-научного изучения археологических находок и его представители не воспринимались тогда в контексте развития археологии ни в России, ни в мире. Гуманитарное и естественно-научное сообщества в то время еще практически не пересекались, не имели общих площадок для обмена информацией, изданий. Многочисленные методологические и идеологические разногласия с обеих сторон не благоприятствовали их сближению.

К началу XX века реставрационная деятельность в России практически выделилась из археологии и примкнула к искусствоведению и музееведению. Развитие научной реставрации все в большей степени подразумевало широкое применение естественно-научных методов.

После революции 1917 г. нарождавшаяся советская наука и культура, невзирая на все трагические события и потери тех лет, породила целый ряд новаторских идей, произведений и форматов, зачастую намного опередивших свое время. Несмотря на тяжелое экономическое положение, разруху, прямую военную угрозу на внутренних и внешних фронтах, большевистское правительство понимало всю важность и срочность мер, связанных с развитием науки советской республики. Процессы слома старой системы и создания учреждений, институтов нового типа распространились и на гуманитарную сферу. Уже в 1919 г. В.И. Ленин подписал декрет Совета народных комиссаров о создании в Петрограде Российской академии по истории материальной культуры РАИМК<sup>1</sup>. Три ее отделения: этнологическое, археологическое и художественное, должны были заниматься, согласно Уставу Академии, всесторонним исследованием и сохранением памятников материальной культуры.

Также в 1919 г. в составе Академии был образован Институт археологической технологии (ИАТ). Он стал совершенно новаторским, причем не только для своего времени, научным учреждением, где успешно шли исследования объектов культурного наследия с использованием самых современных естественно-научных методов.

Идеологом создания и первым руководителем ИАТ стал знаменитый минералог, геохимик

А.Е. Ферсман, который, по сути, олицетворял собой естественно-научное направление в деятельности института. Гуманитарную линию возглавил известный искусствовед, археолог М.В. Фармаковский, ставший ученым секретарем Института.

Основатели ИАТ так определяли принципы работы Института: “Физический метод в настоящее время побеждает, он подчинил себе даже химию, в ее области решая основные проблемы атома и его свойства, он совершенно преобразовал кристаллографию, он мощно врывается в астрономию, геологию и во весь цикл биологических дисциплин: перед всемогуществом физической методики, вооруженной математическим анализом, ничто не может устоять и сохранить устаревшие традиции работы.

Эти новые подходы пока не коснулись наук гуманитарных, и жизнь настойчиво требует ввести мысль историка или археолога в тот цикл научного мышления, который мы называем естественно-историческим мирозерцанием.”<sup>2</sup>

По сути, деятельность ИАТ основывалась на новой методологической парадигме – историко-технологическом подходе, где акцент делался именно на изучение процессов получения и обработки сырья, технологий производства, на материалы [11]. Соответственно, для этого комплекса исследований использовался целый спектр естественно-научных методов. Было выделено пять основных направлений исследований: камня, керамики и стекла, технологии красок и живописной техники, металла и органических останков.

Подобный новаторский по своим подходам научно-исследовательский Институт археологии и искусствоведения был создан в этот период и в Москве.

Также в 1918 г. по инициативе И.Э. Грабаря создана Всероссийская Комиссия по сохранению и раскрытию памятников древней живописи. В ее работе сочетались основы принципиально нового подхода к реставрации: глубокий искусствоведческий анализ с исследованием артефактов естественно-научными методами.

Еще в январе 1917 г. в реставрационных мастерских Государственного Эрмитажа была организована химическая лаборатория, в которой разрабатывали передовые методы реставрации и консервации артефактов из различных материалов – от металлов до бумаги. В 1933 г. в Эрмитаже создана Лаборатория научной реставрации произведений прикладного искусства, которая в сотрудничестве с ИАТ развивала методики по реставрации особо сложных объектов из металла. В 1936 г. в Эрмитаже возник первый в стране му-

<sup>1</sup> С 1926 г. Государственная академия по истории материальной культуры ГАИМК.

<sup>2</sup> Известия Института археологической технологии / Под ред. Ферсмана, Фармаковского. Л., 1924. Вып. 2. С. 3.

зейный рентгенологический кабинет, где проводились реставрационные исследования артефактов.

В последующие десятилетия именно особенности взаимодействия рентгеновского излучения с веществом — неразрушающий характер исследований, чувствительность к элементному составу и кристалличности/аморфности изучаемых объектов, возможность проводить трехмерную визуализацию внутреннего строения предметов, выявлять скрытые дефекты, предметы и особенности структуры на макро- или микроскопическом уровне — позволили рентгеновским и синхротронным методам исследований получить широкое применение в историческом материаловедении [12].

В 1930-е годы в СССР формируется новая система организации археологических работ, реставрации и охраны памятников. Возникают учреждения нового типа, соединяющие в работе с памятниками культуры гуманитарный и естественно-научный подходы. По мере развития естественных наук их методы начинают все более активно применяться в исследованиях объектов культурного наследия, в научной реставрации.

После Великой Отечественной войны, принесшей огромные потери, в том числе связанные с варварским уничтожением нацистами великого множества памятников культуры, внедрение естественно-научных методов в реставрацию начало развиваться ускоренными темпами.

Принципиально новый этап в развитии естественно-научных методов начинается в рамках атомного проекта, который дал импульс появлению большого числа новых технологий и методов исследований, в том числе активно востребованных в археологии и научной реставрации. В СССР эти методы начали активно внедряться Б.А. Колчиным в Институте археологии АН СССР, где в конце 1950-х годов по его инициативе начало развиваться направление по использованию естественно-научных методов в археологии. Такие исследования также успешно проводились в то время на кафедре археологии исторического факультета МГУ и в лаборатории археологической технологии в Институте археологии в Ленинграде под руководством С.И. Руденко.

Первое “Всесоюзное совещание по применению в археологии методов исследований естественных и технических наук” прошло в 1963 г. в Москве. Именно здесь впервые прозвучали основные тезисы, согласно которым “изучение археологических источников только с точки зрения морфологии, функционального назначения и типологии, т.е. методами классической археологии, без каких-либо объективных методов раскрытия физических, биологических и иных свойств вещей и их сочетаний, приводит к значительной

потере исторической информации.”<sup>3</sup> Б.А. Колчиным выделены пять основных направлений взаимодействия археологии с естественными науками: 1) для полевой археологии — это поиск, разведка и изучение археологического памятника в поле (геофизика, аэрофотометрия и др.); 2) для изучения истории древнего производства — методы металлографии, петрографии, спектроскопии, рентгеноскопии, термического анализа, радиографии, химико-технического анализа, активационного анализа, изотопного анализа, остеологии, палеоботаники, пыльцевого анализа, карпологии; 3) абсолютная хронология требует методов датирования — радиоуглеродного, археомагнитного, дендрохронологического, термолюминесцентного; 4) решение проблемы “человек и биосфера” — палеоботаника, палеогеография; 5) применение математических средств и методов во всех звеньях научных исследований археолога [13].

В этот период и естественно-научное, и гуманитарное сообщество в СССР все больше осознают перспективы и важность сближения методов исследований [14]. Так же, как в археологии, эти тенденции развивались в 1950–1980 гг. в научной реставрации, результатом чего стало создание научно-реставрационной производственной мастерской в Ленинграде, Центральной научно-реставрационной мастерской и Всесоюзной центральной научно-исследовательской лаборатории по консервации и реставрации музейных художественных ценностей в Москве. Продолжало расширяться применение естественно-научных методов в Центральной художественно-реставрационной мастерской им. академика И.Э. Грабаря.

Речь идет именно о научном исследовании объектов реставрационных работ, каждый из этапов которого имеет свои нюансы. Перед началом работ необходимо, в первую очередь, детально изучить артефакт, буквально послойно увидеть его структуру, чтобы точно определить, какие материалы использовались при его создании, как менялись их качества в дальнейшем. Углубленная информация о материале исследуемого объекта, включая его состав, структуру и свойства, позволяет реставратору прежде всего сделать выводы о степени сохранности объекта, определить скрытые дефекты, технику работы мастера при создании артефакта, выработать оптимальные методы для последующей реставрации и экспонирования объекта. Такой комплекс исследований важен и для датировки произведения, уточнения авторства, определения его подлинности.

<sup>3</sup> Колчин Б.А. Физико-математические методы в археологии // Новое в применении физико-математических методов в археологии. М.: Наука, ГРВЛ, 1979. С. 4.

Применительно к живописи наиболее востребованы сегодня такие взаимодополняющие методы, как исследование картины в УФ- и ИК-лучах, определенные виды фотографии и рентгенографии, микрохимический анализ. Этими методами определяются химический состав материалов, используемых в живописи (пигменты, лаки), а также структура минералов, тканей, кожи, бумаги и др. Соответственно, в этих случаях исследования проводят с помощью различных видов рентгеновских установок и микроскопов, УФ- и ИК-спектрографов [15].

В целом можно сказать, что в 1950–1980 гг. естественно-научные методы оказались более востребованы именно в научной реставрации, так как они показали высокую эффективность в практических работах в этой области.

Однако, несмотря на активизацию применения естественно-научных методов в научной реставрации и археологии в нашей стране, их окончательного объединения в отдельное направление не произошло. Распад СССР, стагнация в науке в 1990-е гг. сильно затормозили развитие исторического материаловедения. За рубежом, напротив, в последние десятилетия XX века началось активное расширение исследований в этой области. В том числе это было связано с расширением спектра и возможностей материаловедческих методов исследований на больших (мега) установках (ускорителях, источниках синхротронного и нейтронного излучения) в изучении объектов культурного наследия.

В России позитивные изменения по активизации сотрудничества гуманитариев и институтов естественно-научного профиля в рамках совместных проектов разработки комплексного подхода к исследованию объектов культурного наследия начались с середины 2000-х гг. Здесь необходимо отметить позитивную роль Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства науки и высшего образования, где успешно прошел целый ряд междисциплинарных конкурсов, ориентированных, в том числе, на применение естественно-научных методов в историческом материаловедении. В связи с тем, что в рамках совместных проектов работали научные коллективы со всей страны, из различных музеев, институтов гуманитарного и естественно-научного профиля, постепенно удалось сформировать комплексный подход к исследованию объектов культурного наследия, общие научные задачи и алгоритмы работы. Все это способствовало росту востребованности исследований культурного наследия в сотрудничестве гуманитариев с естественно-научными институтами и лабораториями, возникновению междисциплинарной среды в области исторического материаловедения внутри российского научного сообщества.

В настоящее время в России исследования в области исторического материаловедения развиваются как в гуманитарных учреждениях, музеях, университетах, так и в институтах естественно-научного профиля.

Новое междисциплинарное направление исторического материаловедения начало развиваться по инициативе М.В. Ковальчука в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт” с 2016 г. [16]. Это стало возможным благодаря уникальным компетенциям Курчатовского института в области материаловедческих исследований, связанных прежде всего с различными направлениями атомного проекта и новейшим развитием нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных технологий. В их рамках заметную роль в последние годы начало играть историческое материаловедение. Для его развития была создана Лаборатория естественно-научных методов в гуманитарных науках.

Исследования развернулись в сотрудничестве с Институтом археологии РАН, Государственным историческим музеем, Государственным музеем изобразительных искусств имени А.С. Пушкина, Российской национальной библиотекой, Институтом археологии Крыма и другими гуманитарными учреждениями России.

На основании анализа ключевых результатов циклов исследований объектов культурного наследия различной природы, выполненных на экспериментальной базе НИЦ “Курчатовский институт”, на базе выявленных закономерностей была выработана методология исследований применительно к каждой из групп материалов и объектов и получены новые результаты, недостижимые ранее с применением только методов сравнительно-исторического анализа. В рамках проведенных работ решались самые различные задачи и определялись оптимальные методы исследований.

#### НАИБОЛЕЕ ВОСТРЕБОВАННЫЕ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ РАЗНОЙ ПРИРОДЫ И ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Выбор исследовательских методов в изучении объектов культурного наследия определяется материалом изучаемых предметов, их сохранностью и научными задачами, сформулированными совместно представителями естественно-научного профиля и гуманитариями.

По опыту комплексных работ, проведенных в Лаборатории естественно-научных методов в гуманитарных науках НИЦ “Курчатовский институт”, наиболее востребованными в ходе исследований являются взаимодополняющие методики синхротронной и нейтронной диагностики, электронная микроскопия и элементный микроана-

лиз, газовая хроматография (ГХ) и масс-спектрометрия (МС), компьютерная томография (КТ), 3D-сканирование и моделирование. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки, но путем комбинации таких комплементарных методов возможно получить детальную информацию практически о любом материале и объекте. В ходе исследований в НИЦ “Курчатовский институт” проводилось условное разделение материалов на три большие группы: металлы, органические и неорганические материалы.

Особенности взаимодействия рентгеновского излучения с веществом — неразрушающий характер исследований, чувствительность к элементному составу и аморфности изучаемых объектов — позволяют получать детальную информацию об их структуре и составе, проводить трехмерную визуализацию внутреннего строения объектов, выявлять скрытые дефекты и особенности структуры на макро- или микроскопическом уровне. Применительно к вопросу сохранности музейных объектов это дает возможность увидеть и изучить происходящие в них скрытые процессы деградации, понять причины и определить варианты решения проблемы.

В связи с этим широко применяется метод рентгеновской томографии. Эффективным методом анализа для определения элементного состава сложных многокомпонентных объектов является рентгенофлуоресцентный анализ. Для исследования материалов, имеющих кристаллическую структуру: керамика, минералы, иногда металл, весьма результативен рентгенофазовый анализ (РФА).

На сегодня наиболее универсальным аналитическим методом, который позволяет получать детальные сведения одновременно о природе, составе, структуре, происхождении материала и технике изготовления исследуемого объекта, являются взаимодополняющие синхротронно-нейтронные исследования. Свойства нейтронного излучения особенно востребованы в исследованиях сложных объектов культурного наследия, сочетающих в себе неорганические и органические элементы.

Еще одним актуальным в историческом материаловедении методом является электронная микроскопия, которая в сочетании с микроанализом позволяет исследовать широкий спектр органических (дерево, краски, бумага, пергамен) и неорганических (металлы, минералы) материалов, а также более сложные артефакты, в которых эти материалы сочетаются [17].

Все органические компоненты в археологических объектах представляют собой сложные смеси. Со временем из-за распада органических веществ эта сложность возрастает, поэтому для идентификации молекулярных структур в таких смесях чрезвычайно актуальными являются хроматографические и масс-спектрометрические

методы анализа. Эти методы очень информативны при исследовании состава остатков пищи, напитков, масел, смол, бальзамов, красок, лаков, определении породы древесины, идентификации растительных и животных останков. Методы хромато-масс-спектрометрии позволяют также определять состав тканей (лен, хлопок, шелк, шерсть и пр.), породу дерева, а в некоторых случаях и место его произрастания. Несмотря на то что все методы хроматографии являются разрушающими, для проведения анализа необходим очень малый объем образца — порядка нескольких миллиграммов [18].

Из хорошо зарекомендовавших себя в исследованиях объектов культурного наследия методов также необходимо упомянуть масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) и атомно-эмиссионную спектроскопию. С их помощью определяется с очень высокой чувствительностью микро- и следовой примесный состав материала, а также изотопный состав образцов, что востребовано для определения элементного состава образцов в различных областях — от геологии до объектов культурного наследия [19].

#### НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ РАБОТ В ОБЛАСТИ ИСТОРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В НИЦ “КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ”

Одним из первых исследований Лаборатории естественно-научных методов в гуманитарных науках НИЦ “Курчатовский институт” стало изучение скульптур эпохи Возрождения (Иоанн Креститель и танцующий Амур) из коллекции ГМИИ им. А.С. Пушкина. В результате этой работы были определены состав металла и состояние артефактов, благодаря чему удалось подтвердить авторство Д. Донателло для одной из скульптур и дать рекомендации по их дальнейшей реставрации. Методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) совместно с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом (ЭРМ) изучено количественное содержание и распределение химических элементов в составе вещества. Для исследования фазового состава использовался метод РФА на станции “Белок” “КИСИ-Курчатов”. Нейтронные радиографические и томографические исследования внутреннего строения статуй проводились на реакторе ИР-8. Проведенное комплексное исследование естественно-научными методами этих артефактов эпохи Возрождения позволило разработать оптимальную программу реставрации, включая технологию очистки поверхности статуй, их консервацию и дальнейшее экспонирование. Сегодня скульптура Иоанна Крестителя вновь доступна для специалистов и посетителей ГМИИ им. А.С. Пушкина [20].

В сотрудничестве со специалистами Института археологии РАН также исследовались матери-



**Рис. 1.** Фото и томограммы креста-энколпиона и вложения в нем (Новгород, раскоп Власьевский-2): 1 – фото до раскрытия и с приоткрытыми створками; 2 – 3D-модель и нейтронный срез после цветовой графической обработки. Темным цветом выделены окисленные участки внутренней части створок [24].

алы и технологии чернения крестов-энколпионов XII–XIII веков из Суздальского Ополя. Состав металла определен методами РЭМ с рентгеновским микроанализом и рентгенофлуоресцентного анализа как многокомпонентная бронза с примесями олова, свинца и цинка. Также определен состав черни креста, который представлял собой сульфид меди с включениями свинца, по всей видимости, добавленного мастерами для снижения температуры плавления черневой массы. Версия, что при декорировании створок изначально использовалась именно техника вставок, также была проверена с помощью нейтронной и синхротронной томографии, когда на томографических срезах стало видно значительное возвышение декора над поверхностью створки. Это дало новую информацию о схожести технологий чернения древнерусских мастеров с аналогами из Византии и Европы.

Также неразрушающими методами определены внутренние вложения в мошевики. В результате проведенной рентгеновской и нейтронной визуализации внутренней полости объекта удалось установить месторасположение и форму фрагментов содержимого. Была отработана методика применения взаимодополняющих возможностей томографии на разных типах излучения в сочетании с данными элементного анализа применительно к сложным многокомпонентным объектам культурного наследия. Исследование содержимого мошевиком методами ГХ и газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ-МС) показало, что в качестве вложений в энколпионах присутствуют частицы дерева и смолы, воска и ладана, фрагменты льняного, шелкового, конопляного волокна и неизвестного травянистого растения (рис. 1). Эта важная информация дополнила очень скудные сведения о роде реликвий и их почитании в домонгольской Руси [21–24].

Важные результаты дал многокомпонентный комплекс повторных исследований современными естественно-научными методами известных артефактов из старых коллекций Государствен-

ного исторического музея. Он включал в себя определение путем сопоставления нескольких объектов из захоронений одного периода состава “покрытия” наконечника медного копья IV тысячелетия до н.э. и изучение механизма его формирования на изделии. Результаты, полученные с помощью РЭМ, показали, что основным металлом наконечника копья был медно-мышьяковый сплав. С помощью РФА пробы его “покрытия” выявлено, что наконечник покрыт преимущественно слоем сульфида меди – халькозином, по своему составу и структуре полностью аналогичным природному минералу. Это позволило предположить естественный характер “покрытия” на наконечнике копья, связанный со специфическими особенностями анаэробной атмосферы в погребальной камере.

Кроме того, методами рентгенофлуоресцентного анализа и ЭРМ, а также МС и МС-ИСП был исследован способ золочения уникальной фигурки “идола” из кремационного погребения Черная могила X века. В ходе работы, а также при сопоставлении с объектами из аналогичных погребений этого времени была подтверждена версия об изначально амальгамировании фигурки, а отсутствие ртути в приповерхностном слое объяснилось ее испарением при высоких температурах в погребальном костре.

Приведенные выше примеры хорошо демонстрируют важность комплексного подхода к исследованию археологических объектов, когда сравнение полученных результатов и анализ условий их захоронения в единой логической цепочке позволяют реконструировать особенности древней технологии.

В рамках изучения на новом уровне уникальных артефактов из Черной могилы – известнейшего памятника дохристианской Руси X века – из спекшегося в погребальном костре конгломерата были исследованы шлем, фрагменты наконечника копья и стрелы, меча. Это стало возможно при помощи целого комплекса неразрушающих методов визуализации, включавших в себя рентгенов-



скую КТ, синхротронную радиографию и томографию на источнике синхротронного излучения “КИСИ-Курчатов”, нейтронную томографию на исследовательском реакторе ИР-8.

Рентгеновская и нейтронная томография являются взаимодополняющими методами, так как в связи с разными механизмами взаимодействия этих излучений с веществом в итоге получается наиболее полная картина. Это еще раз доказало данное исследование, так как по его результатам удалось определить линию слома на объектах, реставрационные вмешательства, трещины, участки коррозии, технологические детали изготовления, увидеть в деталях орнамент, выявить клеймо на обеих сторонах лезвия меча.

Выяснилось, что в ходе прежней реставрации ряд объектов был соединен из различных, не принадлежавших им фрагментов. Дальнейшее исследование фрагмента наконечника копья, также составленного при реставрации из фрагментов разных объектов, показало особенности геометрического орнамента на втулке, что позволило уточнить его атрибуцию. С помощью такого же комплекса взаимодополняющих методов выявлен орнамент наконечника стрелы, что дало возможность атрибутировать его происхождение от кочевников юга Восточной Европы.

Таким образом, благодаря применению комплекса естественно-научных и, что особенно важно для хрупких предметов, пострадавших в огне, неразрушающих методов стало возможным детально изучить целый ряд артефактов из уникального памятника Руси X века. Даже при работе с такими сложными объектами, часть из которых считались безвозвратно утраченными, удалось выявить особенности их внешнего вида, декора, состояния, уточнить технологии их изготовления, степень сохранности, более точно их атрибутировать [25, 26].

В рамках развития работ по историческому материаловедению в НИЦ “Курчатовский институт” также исследована большая группа органических объектов, включающая в себя продукты жизнедеятельности человека и животных, остатки растений, сохранившихся в археологических памятниках главным образом в виде семян и древесных тканей. В процессе этих исследований изучались и единичные объекты, например сложносоставное изделие из могильника Березовый рог II тыс. до н.э., инкрустированное семенами воробейника полевого. По итогам исследований этот интересный объект состоял из короба из бересты, обтянутого шерстяной тканью, обмазанного сверху слоем жидкой глины и животного жира, на который нанесли орнамент из семян воробейника полевого [27].

Также исследован образец ладана, найденного в усадьбе в древнем центре Владимира, погибшей при взятии города войском Батыя в 1238 г. Объек-

ты, обнаруженные в усадьбе, уже изучались естественно-научными методами в конце 1990-х — начале 2000-х гг. Новое исследование с помощью метода ГХ-МС позволило уточнить, что образец представляет собой воскомастику — смесь остатков ладана, подвергшегося сильному термическому воздействию в кадилнице во время богослужения, и пчелиного воска [28].

Кроме того, проведен цикл исследований по установлению содержимого различных сосудов. Определение их функции дает важную информацию о повседневной жизни, торговле, погребальных обычаях и пище наших предков. Оптимальными методами в этих исследованиях являются ГХ и МС. Именно с их помощью удалось идентифицировать черный налет со стенок сфероконического средневекового сосуда из города Болгар как остатки живичной смолы хвойного дерева, подвергавшейся нагреву, и таким образом определить функцию сосуда как дистилляционный аппарат — “аламбик” для перегонки живицы.

Теми же методами определено содержимое шести глиняных сосудов XI века из Суздальского Ополья как жир различных одомашненных животных. Кроме того, удалось уточнить атрибуцию среднеазиатского глиняного сосуда из Хивинского ханства как вместилища молочного жира из верблюжьего молока. В то же время анализ остатков пищи из глиняных сосудов бронзового века, найденных в Ярославской и Рязанской областях, определил в них янтарную кислоту, что послужило доказательством их использования для приготовления пищи из рыбных продуктов, что встречается в археологических памятниках достаточно редко [29–31].

В ходе проведенных исследований хорошо зарекомендовал себя анализ пород древесины с помощью ИК-спектроскопии в разработке неразрушающей методики идентификации пород археологической древесины. Успешные результаты получены при сравнительном исследовании нескольких десятков образцов древесины хвойных и лиственных пород деревьев средней полосы России [32].

Еще один комплекс исследований охватывает различные аспекты изучения письменных источников — с точки зрения писчего материала, чернил. Так, с использованием электромагнитного излучения различных спектральных диапазонов и электронной микроскопии подтверждена первоначальная гипотеза, что буквы на средневековой новгородской берестяной грамоте второй четверти XV века были написаны сажевыми чернилами, гусиным пером, что делает этот объект уникальным в своем роде.

Также на берестяной грамоте, относящейся ко второй половине XIV века, был определен элементный состав и проведено элементное картирование участков поверхности как с нанесенны-

ми на нее буквами, так и вне текста. В результате возникла гипотеза о естественном механизме окрашивания букв на этой берестяной грамоте, происходившем в результате вдавления в бересту острия писала, в ходе чего разрушалась субериновая структура межклеточных стенок пробкового слоя бересты и происходило самоокрашивание. Эта версия подтверждена экспериментально на тестовых образцах бересты [33].

Анализ состава красных восковых вислых печатей с русских документов периода конца XV–первой половины XVIII веков проводился с помощью комплекса методов: ИК-спектроскопия, растровая электронная микроскопия с ЭРМ, РФА, МС-ИСП и ГХ-МС, что позволило исследовать и неорганические, и органические компоненты печатей. Таким образом были выявлены характерные черты эволюции их рецептов в русской практике с заметными отличиями от европейских аналогов [34].

Исследования различных пигментов естественно-научными методами – одни из самых востребованных в рамках исторического материалоуедения. В сотрудничестве с Институтом археологии РАН изучены образцы пигментов и горных пород с могильных плит из трех погребальных комплексов каракольской культуры на Алтае, относящиеся к началу II тыс. до н.э. – эпохе ранней бронзы. С использованием методов электронной микроскопии с рентгеновским микроанализом, а также порошковой рентгеновской дифракции установлено, что для получения красного цвета древние художники использовали разные оттенки охры с содержанием гематита, а для рисунков черным цветом они применяли сажу [35, 36].

Еще одной из знаковых работ в цикле нового этапа исследований известных археологических памятников с применением комплекса современных аналитических методов стало повторное изучение состава материала топоров и наверхий булавы из Бородинского клада (XVIII–XVII века до н.э.), хранящегося в Государственном историческом музее, которые при исследованиях в 1980-е гг. были идентифицированы как нефрит и мыльный камень.

Исследования фазового состава артефактов Бородинского клада и сопоставительной выборки артефактов того же периода проводились на станциях “Белок”, “Рентгеноструктурный анализ” и “Структурное материалоуедение” синхротронного источника “КИСИ-Курчатов”. Для анализа элементного состава и микроструктурных особенностей морфологии поверхности образцов использовалась сканирующая электронная микроскопия с ЭРМ. В качестве дополнительного метода изучения химического состава минеральной основы каменных артефактов также применялась ИК-спектроскопия.

По итогам исследований удалось уточнить, что два топора изготовлены из серпентинита, а три – из жадеита. Также новыми были результаты исследований наверхий булавы, основной фазой материала которых оказался антигорит – один из минералов группы серпентинита.

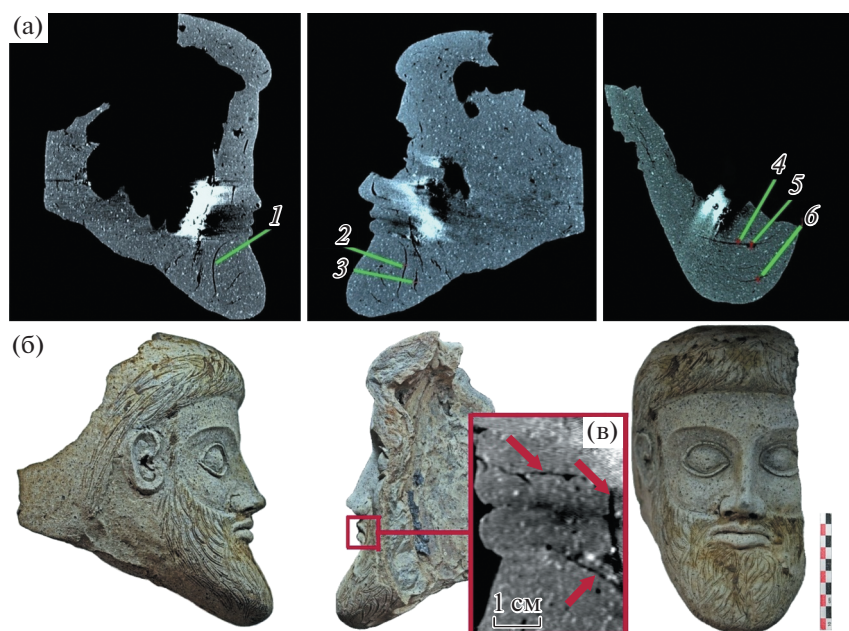
Таким образом, эти исследования, кроме новых выводов о природе материала артефактов, еще раз подтвердили недостаточность только одного аналитического метода для идентификации минералов и горных пород, применявшегося при более ранних исследованиях. Скорее всего при повторном исследовании многих подобных объектов культурного наследия с применением комплекса современных материаловедческих методов могут быть сделаны новые выводы и открытия [37].

Таким же ярким примером комплексного подхода в историческом материалоуедении стало изучение античной скульптурной терракоты V в. до н.э., найденной экспедицией Института археологии РАН при подводных раскопках в г. Керчь. С помощью комплекса аналитических методов – оптической и растровой электронной микроскопии, ЭРМ, рентгеновской дифракции и ИК-спектроскопии, – реконструирована первоначальная раскраска терракоты и установлен состав палитры древних художников. На внутренней части скульптуры обнаружены следы, предположительно, свинцовых напылов.

На втором этапе исследований изучались технологии изготовления терракоты. С помощью нейтронной и рентгеновской томографии в глиняном тесте обнаружилось множество пустот. По их форме и расположению, а также технологическим швам в местах соединения частей глины, соответствующим контуру рельефных черт лица, был сделан вывод о том, что это скульптурная терракота (рис. 2).

Завершающим этапом этого многокомпонентного изучения античной терракотовой головы стало исследование происхождения свинца с ее внутренней поверхности. Для идентификации рудного источника проведен анализ соотношений стабильных изотопов свинцового напыла и более подробно изучен его элементный состав. По итогам исследования сделан вывод о предположительной локализации района добычи изученного свинца в Аттике (Греция, Лаврионские рудники). На данный момент это один из самых ранних зафиксированных случаев оборота этого металла между Афинами и Боспорским государством [38–40].

Особо выделяется в цикле работ в области исторического материалоуедения, проведенных в НИЦ “Курчатовский институт”, междисциплинарное исследование десяти древнеегипетских мумий, в котором наиболее ярко представлена интеграция естественно-научного и гуманитарного знания. При проведении этого исследования



**Рис. 2.** Томографические (КТ) профильные срезы, демонстрирующие технологические швы: а – в глиняном тесте бороды; линиями отмечены точки измерения ширины технологических швов: 1 – 1.3, 2 – 1.7, 3 – 2.4, 4 – 1.8, 5 – 2.7, 6 – 1.3 мм; б – фронтальный и боковые виды изделия; в – профиль губ, технологические швы указаны стрелками [39].

основной целью было решение комплексными естественно-научными, неdestructивными методами фундаментальной научной проблемы изучения египетских мумий как одного из уникальных исторических источников. Их всестороннее исследование в рамках междисциплинарного подхода дает ценную информацию о жизни и здоровье людей, технике и особенностях мумификации, о развитии культуры и медицины в Древнем Египте. Такой синергетический подход позволил впервые в отечественной науке провести всестороннее изучение мумий с применением комплекса естественно-научных и исторических методов исследования, усовершенствовать уже разработанные методы и предложить новые пути извлечения “скрытой” информации.

Исследование включало в себя комплекс методов: КТ, антропологический, медицинский и криминалистический анализ, ГХ-МС, электронную микроскопию, генетический и изотопный анализ, аддитивные технологии для создания моделей исследуемых объектов [41].

Отправной точкой для всего комплекса исследований стало проведение рентгеновской КТ первого экземпляра из коллекции мумий (рис. 3). Таким образом, была отработана методика исследований для следующего этапа при проведении томографии всех остальных целых объектов, а также нескольких голов и мумий животных из коллекции ГМИИ им. А.С. Пушкина: большой кошки, сокола, ибиса, крокодила, котенка, собаки и конгломерата змей.

На основании обработанных и проанализированных рентгеновских компьютерных томограмм определены точные антропологические характеристики, уточнены пол, возраст умерших, имеющиеся патологии и повреждения, наличие внутренних органов и инородных предметов внутри тел. Согласно итогам из десяти исследуемых мумий пять были женщинами и пять – мужчинами. В возрасте до 35 лет умерло пять человек, трое – в диапазоне от 35 до 60 лет, и две женщины скончались в возрасте от 50 до 75 лет. В трех случаях половая принадлежность мумий отличалась от музейных данных, базирующихся на надписях на саркофаге [42].

Также исследованы бальзамирующие составы тела и волос, подтвержден тип ткани для бинтования, проведены генетический и изотопный анализы ряда мумий.

Разработан способ географической идентификации битума в бальзамирующих смолах по относительному содержанию ванадия, никеля и молибдена [43].

Дополнительно проведено комплексное исследование покрытия волос голов трех мумий методами оптической микроскопии, ИК-спектроскопии, ГХ и МС. По его итогам установлено, что при мумификации в Древнем Египте для покрытия волос использовали специальные бальзамирующие составы, отличающиеся от рецептов для бальзамирования тел [44].

Впервые в России было проведено генетическое исследование мумий. Прежде всего оно подтвердило данные краниометрического анализа по

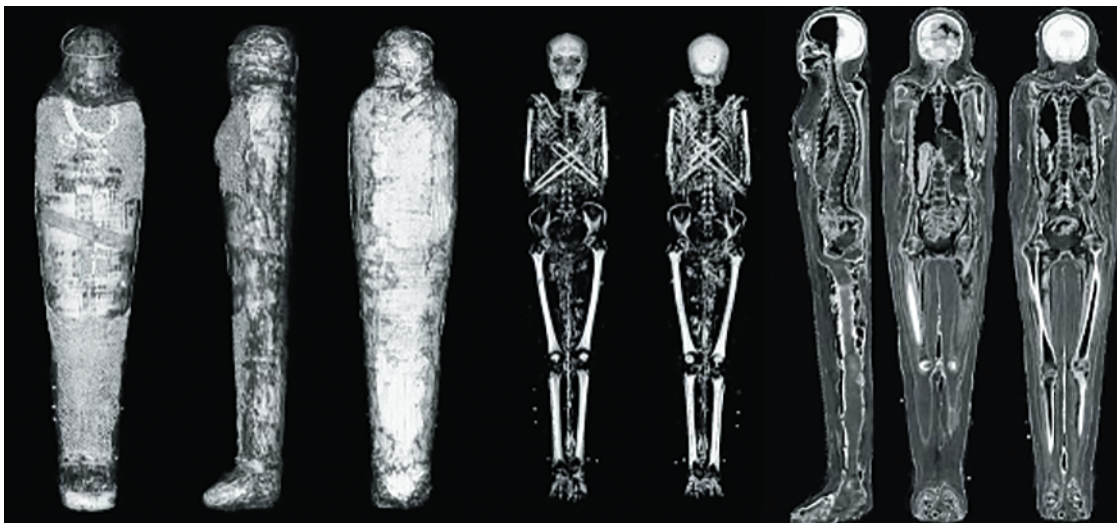


Рис. 3. Реконструкция тела мумии женщины из саркофага Хор-Ха (I, 1a 5301) [41].

определению средиземноморского антропологического типа и пола. Также впервые в отечественной науке удалось исследовать ДНК мумий на наличие заболеваний, в ходе исследования выделены патогены сыпного тифа и газовой гангрены [45].

Успешное проведение сложной процедуры выделения ДНК стало возможным, так как на основании изображений КТ был разработан методический подход к изъятию образцов с высоким содержанием эндогенного ДНК, рассчитано количество костного порошка, получаемого из объектов разных размеров. Таким образом, удалось не только отобрать образцы наименее разрушающим способом, рассчитав глубину проникновения для забора материала, но и заранее рассчитать точки, где шансы на дальнейшее успешное секвенирование ДНК наиболее высоки. Это имеет важное практическое значение для дальнейших подобных исследований.

Также на основе данных КТ получена углубленная информация об особенностях внутренней структуры одной из мумий, технике ее бальзамирования и ритуального декора, что позволило в сочетании с историко-искусствоведческими методами уточнить ее датировку — вторая половина I века н.э. — и происхождение из некрополя Хавары.

Это первая подобная работа для отечественной науки, а возможности КТ для изучения прически и декоративных картонажных элементов мумии практически не описаны и в зарубежной литературе. Результаты исследования, несомненно, доказывают перспективность дальнейшего использования метода КТ для неинвазивных исследований целого ряда объектов культурного наследия, включая такие сложные, как мумии [46].

Завершающим этапом в междисциплинарном исследовании древнеегипетских мумий стала реконструкция внешности. Использование резуль-

татов КТ как референсов и вспомогательных 3D-моделей при работе над реконструкцией позволило применить комбинированный подход к реконструкции в сочетании с методом М.М. Герасимова. Результаты совместного исследования были представлены на выставке в ГМИИ им. А.С. Пушкина “Мумии Древнего Египта. Искусство бессмертия” с 1 марта по 31 мая 2022 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование нового междисциплинарного направления — исторического материаловедения — взаимосвязано с общими тенденциями интеграции естественных и гуманитарных наук на современном этапе расширения междисциплинарности.

Синергетический подход с применением комплекса естественно-научных и исторических методов исследования позволяет усовершенствовать уже разработанные подходы, предложить новые пути извлечения “скрытой” информации из различных типов материальных источников, ввести в научный оборот значительный объем новой исторической информации, повысить достоверность атрибуции исследуемых объектов.

В ходе исследований, проведенных в Лаборатории естественно-научных методов в гуманитарных исследованиях НИЦ “Курчатовский институт”, получен целый ряд новых исторических данных, уточнены и перепроверены выводы исследований прежних лет. Полученные результаты еще раз подтвердили крайнюю важность и необходимость комплексного подхода, единого алгоритма действий по анализу объектов и интерпретации полученных данных со стороны представителей как естественно-научного, так и гуманитарного сообщества.

Анализ развития исторического материаловедения позволяет сделать вывод о несомненной

перспективности дальнейшего совершенствования естественно-научных методов для изучения объектов культурного наследия, значимости исторического материаловедения для российской науки и культуры, высокой степени просветительского потенциала и привлекательности итогов работ в этой сфере для популяризации науки среди самых широких кругов населения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гайдено П.П.* Эволюция понятия науки. М.: Наука, 1980. 568 с.
2. *Шредингер Э.* Природа и греки. Ижевск, 2001. 81 с.
3. *Винер Н.* Кибернетика и общество. М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. 200 с.
4. *Вернадский В.И.* // Собрание сочинений: в 24 т. М.: Наука, 2013. Т. 10. С. 95.
5. *Вернадский В.И.*: pro et contra: Антология литературы о В.И. Вернадском за 100 лет (1898–1998). СПб., 2000. 871 с.
6. *Лукреций* О природе вещей. М.: Художественная литература, 1983. 383 с.
7. *Pollard M., Batt C., Stern B., Young S.M.M.* // Analytical Chemistry in Archaeology. Manuals in Archaeology. Cambridge, 2011. P. 6.
8. *Гурвич Д.М.* // Краткие сообщения Института истории материальной культуры. М., 1957. Т. 16. С. 119.
9. *Бобров Ю.Г.* // От мастерской к кафедре реставрации живописи. Фотохроника. 1971–2017. Альбом. СПб., 2017. С. 4.
10. *Зверев В.В.* // От поновления к научной реставрации. М.: ГосНИИР, 1999. С. 91.
11. Известия Института археологической технологии. Вып. I. Пб: Гос. изд-во, 1922. 194 с.
12. *Ковальчук М.В., Яцишина Е.Б., Благос А.Е. и др.* // Кристаллография. 2016. Т. 61. № 5. С. 681.
13. *Колчин Б.А.* Физико-математические методы в археологии // Новое в применении физико-математических методов в археологии. М.: Наука, ГРВЛ, 1979. 124 с.
14. *Ваганов П.А.* Физики дописывают историю / Под ред. Шера Я.А. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 215 с.
15. *Косолапов А.И.* Естественно-научные методы в экспертизе произведений искусства. СПб.: Изд-во Гос. Эрмитажа, 2010. 170 с.
16. Естественно-научные методы в гуманитарных науках: совещание-семинар [13 марта 2015 г., г. Москва] / НИЦ “Курчатовский институт”; Государственный исторический музей. М., 2015. 104 с.
17. *Васильев А.Л., Ковальчук М.В., Яцишина Е.Б.* // Кристаллография. 2016. Т. 61. № 6. С. 845.
18. *Пожидает В.М., Сергеева Я.Э., Слушная И.С. и др.* // Бутлеровские сообщения. 2017. Т. 52. № 12. С. 73.
19. *Поташева И.М., Светов С.А.* // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 4. С. 136.
20. *Глазков В.П., Коваленко Е.С., Мурашев М.М. и др.* // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 4. С. 670.
21. *Колобылина Н.Н., Грешиников Э.А., Васильев А.Л. и др.* // Кристаллография. 2017. Т. 62. № 4. С. 543.
22. *Зайцева И.Е., Грешиников Э.А., Велигжанин А.А. и др.* // Российская археология. 2019. № 3. С. 50.
23. *Говор Л.И., Грешиников Э.А., Зайцева И.Е. и др.* // Краткие сообщения Института археологии. 2017. № 249-II. С. 348.
24. *Коваленко Е.С., Подурец К.М., Грешиников Э.А. и др.* // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 5. С. 826.
25. *Каинов С.Ю., Коваленко Е.С., Подурец К.М. и др.* // Российская археология. 2021. № 2. С. 55.
26. *Коваленко Е.С., Подурец К.М., Мурашев М.М. и др.* // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 5. С. 56.
27. *Азаров Е.С., Пожидаев В.М., Шишлина Н.И. и др.* // Краткие сообщения Института археологии. 2016. № 244. С. 391.
28. *Пожидает В.М., Зайцева И.Е., Камаев А.В. и др.* // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 5. С. 128.
29. *Pozhidayev V., Kamaev A., Kovalchuk M. et al.* // Archaeometry. 2017. V. 59. № 6. P. 1095.
30. *Пожидает В.М., Зайцева И.Е., Камаев А.В. и др.* // Краткие сообщения Института археологии. 2016. № 245-II. С. 226.
31. *Пожидает В.М., Сергеева Я.Э., Слушная И.С. и др.* // Бутлеровские сообщения. 2017. Т. 52. № 12. С. 73.
32. *Пожидает В.М., Ретивов В.М., Панарина Е.И. и др.* // Журн. аналит. химии. 2019. Т. 74. № 12. С. 911.
33. *Созонтов Е.А., Преснякова Н.Н., Пахунов А.С. и др.* // 7-я Европейская конференция по рассеянию нейтронов: тезисы микросимпозиумов (1–4 июля 2019 г.). СПб., 2019. С. 96.
34. *Носова Е.И., Вебер Д.И., Проскуракова М.Е. и др.* // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 5. С. 40.
35. *Пахунов А.С., Дэвлет Е.Г., Каратеев И.А. и др.* // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 6. С. 984.
36. *Пахунов А.С., Дэвлет Е.Г., Молодин В.И. и др.* // Археология, этнография и антропология Евразии. 2017. Т. 45. № 3. С. 56.
37. *Калинин П.И., Велигжанин А.А., Колобылина Н.Н. и др.* // Труды Государственного исторического музея. 2019. Выпуск XXX. С. 40.
38. *Грешиников Э.А., Анциферова А.А., Дороватовский П.В. и др.* // Кристаллография. 2019. Т. 64. № 6. С. 999.
39. *Ковальчук М.В., Яцишина Е.Б., Макаров Н.А. и др.* // Кристаллография. 2020. Т. 65. № 5. С. 832.
40. *Кашкаров П.К., Ковальчук М.В., Макаров Н.А. и др.* // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 1. С. 159.
41. *Яцишина Е.Б., Ковальчук М.В., Лошак М.Д. и др.* // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 3. С. 479.
42. *Яцишина Е.Б., Васильев С.В., Боруцкая С.Б. и др.* // Археология, этнография и антропология Евразии. 2019. Т. 47. № 3. С. 136.
43. *Яцишина Е.Б., Пожидаев В.М., Сергеева Я.Э. и др.* // Тонкие химические технологии. 2019. Т. 14. № 4. С. 45.
44. *Яцишина Е.Б., Пожидаев В.М., Сергеева Я.Э. и др.* // Журн. аналит. химии. 2020. Т. 75. № 2. С. 171.
45. *Яцишина Е.Б., Булыгина Е.С., Васильев С.В. и др.* // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 5. С. 2.
46. *Яцишина Е.Б., Васильев С.В., Васильева О.А. и др.* // Кристаллография. 2020. Т. 65. № 6. С. 975.