

УДК 539.1.06

ИССЛЕДОВАНИЯ МОНЕТ СРЕДНЕВЕКОВОЙ ВОЛЖСКОЙ БОЛГАРИИ МЕТОДАМИ НЕЙТРОННОЙ ДИФРАКЦИИ И ТОМОГРАФИИ

© 2020 г. Б. А. Бакиров^{a, b, *}, С. Е. Кичанов^{b, **}, Р. Х. Храмченкова^{a, c},
А. В. Белушкин^{a, b, d}, Д. П. Козленко^b, А. Г. Ситдииков^{a, c}

^aКазанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Республика Татарстан, Россия

^bОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980 Россия

^cИнститут археологии им. А.Х. Халикова Академии наук Республики Татарстан,
Казань, 420012 Республика Татарстан, Россия

^dДубненский государственный университет, Дубна, 141980 Россия

*e-mail: bulatbakirov4795@gmail.com

**e-mail: ekich@nf.jinr.ru

Поступила в редакцию 24.08.2019 г.

После доработки 17.09.2019 г.

Принята к публикации 17.09.2019 г.

Методами нейтронной дифракции и нейтронной томографии исследован фазовый состав и пространственное распределение химических компонентов в объеме монет средневековой Волжской Болгарии. Исследованы две монеты, относящиеся к разным временным периодам этого средневекового государства: мультидирхем саманидов, датируемый первой половиной X века; и серебряная дирхем времен правления эмира Болгарской земли Булат-Тимура. Установлено, что обе монеты состоят из медно-серебряного сплава. В мультидирхеме саманидов среднее объемное содержание меди и серебра составило около 50%. Обнаружены незначительные пространственные вариации химического состава в объеме исследуемого мультидирхема. Установлено, что объемное среднее содержание серебра в дирхеме Булат-Тимура составляет около 95%.

Ключевые слова: методы неразрушающего контроля, монеты Волжской Болгарии, нейтронная дифракция, нейтронная томография, культурное наследие.

DOI: 10.31857/S1028096020040044

ВВЕДЕНИЕ

Детальные исследования физико-химических свойств древних монет являются одним из важных направлений в неразрушающем контроле объектов культурного наследия [1, 2]. С одной стороны, нумизматический материал хранит ценную информацию о торгово-экономическом и социальном развитии древних цивилизаций и государств, а с другой стороны, монеты являются удобными модельными объектами [3–6] для исследований процессов коррозии и трещинообразования, протекающих в медных или бронзовых, серебряных или золотых археологических находках. Следует отметить, что полученные экспериментальные данные имеют важное значение для развития методологии реставрации и сохранения ценных археологических находок [7, 8], а также являются неопенимым материалом при идентификации аутентичности и подлинности особо ценных артефактов.

Исследования древних монет современными неразрушающими методами связаны не только с

экспериментальной фиксацией внутренних дефектов и выявлением распространения коррозии [3, 6], но и с детальным изучением вариаций химического и фазового состава внутри исследуемых объектов [9–13]. Известно, что химический состав нумизматического материала может дать важную информацию о месторождениях серебряной или золотой руды [12–14], из которой изготовлены монеты, соответствие определенному историческому периоду или особенностям чеканки, выявлению подделок [15]. Признанные в археологических и реставрационных научных сообществах неразрушающие методы рентгенофлуоресцентного анализа, электронной микроскопии и металлографии имеют существенное ограничение по глубине проникновения в толщу исследуемых монет [16–19]. Полученные вышеупомянутыми методами данные о химическом составе соответствуют только поверхностным слоям материала, что может быть критическим при исследовании монет из сплава меди и серебра [16, 20]. Для таких монет характерно максимальное содер-

жание серебра именно на поверхности [11, 16], что связывают с определенными процессами во время расплава исходной руды [21], особенностями чеканки монет [22] или процессами ликвации обогащенной серебром фазы двухкомпонентного сплава [11, 16]. Поэтому данные о химическом составе, полученные с поверхности монет, могут кардинально отличаться от распределения химических компонентов во всем объеме [23–26]. В этом случае выглядит оправданным применение методов неразрушающей структурной диагностики с высокой проникающей способностью в толщу металлических объектов. К таким методам относится метод нейтронной дифракции [9–11], дающий информацию о фазовом составе исследуемого объекта, и метод нейтронной радиографии и томографии, позволяющий получать картину пространственного распределения внутренних компонентов, в том числе и химического состава [3, 6, 11, 24].

В данной работе приводятся результаты структурных исследований средневековых монет с территории Волжской Болгарии [26, 27]. Важным показателем торгово-экономического развития этого средневекового государства является наличие обширного нумизматического материала, найденного в ходе раскопок городов и поселений [28]. Удобное положение Волжской Болгарии на одном из центральных торговых путей привело к созданию экономических предпосылок формирования товарно-денежных отношений на территории Поволжья как внутри региона, так и соседними регионами, что привело к сложению местной монетной чеканки и широкому проникновению монет, чеканенных в других регионах. Изучение серебряных монет Волжской Болгарии новыми методами может позволить выявить особенности химического состава и технологии их изготовления для выявления закономерностей развития монетного средневекового чекана в Среднем Поволжье и других регионах этого времени [13, 29].

Отбор нумизматического материала был произведен с учетом особенностей денежного оборота региона. Для анализа были взяты монеты из фондов Музея археологии Республики Татарстан, относящиеся к двум наиболее активным периодам развития товарно-денежных отношений в регионе и максимального распространения в торговых операциях металлических монет. Мультидирхем саманидов времен хана Аль-Амира ас-Саида Абу Салиха Мансура I бин Нуха, датированный первой половиной X века [30] характеризует домонгольский период развития торговых связей Волжской Болгарии. Вторая монета, серебряный дирхем из Каратунского клада, чеканенная в 1361–1367 гг. во времена правления Булат-Тимура – золотоордынского эмира Болгарской земли, пред-

ставляет другой период активного распространения монет в Поволжье.

Монеты отличаются размерами, что позволяет определить границы информативности метода на современном этапе. Различие в сечениях рассеяния и поглощения нейтронов для меди и серебра позволило исследовать фазовый состав и восстановить его пространственное распределение в этих монетах во всем их объеме.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Фотографии исследуемых монет представлены на рис. 1. Дирхем саманидов представляет собой крупную монету с диаметром около 52 мм. Имеется треугольный скол. На аверсе монеты различимы остатки легенды куфическим шрифтом с круговым орнаментом. Толщина монеты не превышает 0.8 мм. Масса монеты – 7.764 г.

Серебряный дирхем Булат-Тимура является хорошо сохранившейся цельной монетой диаметром ~17 мм. На аверсе и реверсе монеты отчетливо видны надписи куфическим шрифтом. Толщина монеты неравномерна: с одного края она достигает 0.6 мм, а на противоположном тонком крае – около 0.2 мм. Масса монеты – 0.930 г.

Исследования кристаллической структуры и фазового состава монет проводились с помощью метода нейтронной дифракции на специализированном дифрактометре для исследования микрообразцов ДН-6 [31] на высокопоточном реакторе ИБР-2. Дифракционные спектры измеряли при углах рассеяния $2\theta = 90^\circ$. Для данных углов рассеяния разрешение дифрактометра на длине волны $\lambda = 2 \text{ \AA}$ составляло $\Delta d/d = 0.025$. Характерное время измерения одного спектра – 30 мин. Для дополнительных исследований различных участков мультидирхема использовался кадмиевый коллиматор с диаметром щели 5 мм, что позволило исследовать фазовый состав для нескольких участков монет: центра монеты, обозначенный на рис. 1а символом “Ц”, и трех краевых участков – “Кр1”, “Кр2” и “Кр3”. Анализ дифракционных данных производился методом Ритвельда с помощью программы FullProf [32].

Пространственное распределение меди и серебра в монетах исследовалось методом нейтронной радиографии и томографии на специализированной экспериментальной станции [33, 34] на 14 канале импульсного высокопоточного реактора ИБР-2. В этом методе из-за различной степени ослабления интенсивности нейтронного пучка [35] при прохождении через компоненты разного химического состава возможно получить информацию о распределении фаз внутри объема исследуемого материала с пространственным разрешением на микронном уровне [11, 36]. В экспериментах по нейтронной томографии из набора

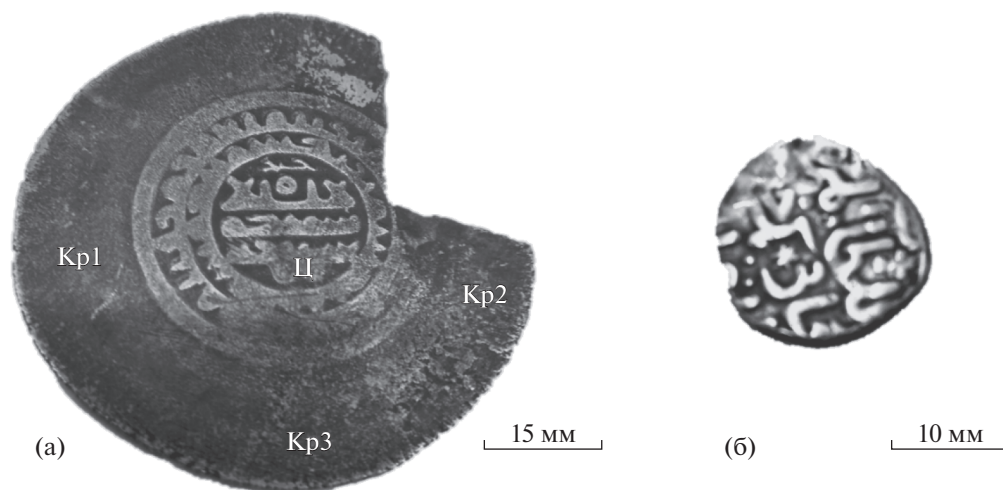


Рис. 1. Фотографии исследуемых монет древней Волжской Булгарии: мультидирхем саманидов (а) и дирхем Булат-Тимура (б). Для изображений каждой монеты представлены соответствующие шкалы масштаба. На фотографии мультидирхема символами “Кр1”, “Ц”, “Кр2” и “Кр3” обозначены участки монеты, для которых получены нейтронные дифракционные данные.

отдельных радиографических проекций, полученных при различных угловых положениях образца относительно направления нейтронного пучка, выполняется объемная реконструкция внутреннего строения исследуемой монеты. Полученная трехмерная модель представляет собой массив данных из трехмерных вокселей [35], которые характеризуют степень или коэффициент ослабления нейтронного пучка в определенной точке исследуемого образца. Размер одного вокселя в нейтронном радиографическом эксперименте составлял $52 \times 52 \times 52$ мкм. В радиографическом эксперименте конвертация нейтронов в видимый свет, регистрируемый CCD видеокамерой, происходит с помощью пластины сцинтиллятора ${}^6\text{LiF}/\text{ZnS}$ толщиной 0.1 мм производства фирмы RC TRITEC Ltd (Швейцария). Проведение томографических экспериментов обеспечивает система гониометров HUBER с минимальным углом поворота до 0.02° . Высокий поток нейтронов на исследуемом образце определяет короткое время экспозиции – 10 с при регистрации одного нейтронного изображения. Полученные нейтронные данные корректируются на фоновые шумы детекторной системы и нормализуются на падающий нейтронный пучок с помощью программного пакета ImageJ [37]. Томографическая реконструкция из набора угловых проекций исследуемых объектов осуществлялась программой H-PITRE [38]. Для визуализации и анализа получаемых трехмерных данных использован программный комплекс VGStudio MAX 2.2 фирмы Volume Graphics (Heidelberg, Germany).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Нейтронные исследования мультидирхема саманидов

На рис. 2 представлены нейтронные дифракционные спектры, полученные для различных участков исследуемой монеты: противоположный от скола край монеты (обозначен, как “Кр1” на рис. 1а), середина монеты (“Ц”) и участок непосредственно около скола (“Кр2”). Полученные дифракционные спектры соответствуют двум фазам материала монеты: кубической фазе серебра и кубической фазе меди, пространственная группа $Fm\bar{3}m$. Из анализа относительных интенсивностей нейтронных дифракционных пиков, полученных с использованием метода Ритвельда, выявлено соответствующее объемное содержание серебра и меди в материале монеты (табл. 1). Видно, что материал монеты представляет собой сплав, состоящий из практически равных объемных долей серебра и меди. С учетом плотностей меди и серебра можно оценить среднюю массовую долю серебра в монете – около 58.9% или ~ 4.5 г от общей массы монеты.

Незначительные изменения на уровне нескольких процентов в относительных объемных долях серебра и меди для разных участков исследуемой монеты указывают на относительную однородность распределения фазовых компонентов в объеме монеты. Для более детального исследования пространственного распределения меди и серебра в объеме монеты были проведены эксперименты по нейтронной томографии. Коэффициент ослабления нейтронного пучка со средней длиной волны нейтронов $\lambda \sim 2 \text{ \AA}$ для серебра составляет $\Sigma_{\text{Ag}} = 0.79 \text{ см}^{-1}$ [39]. Это значение прак-

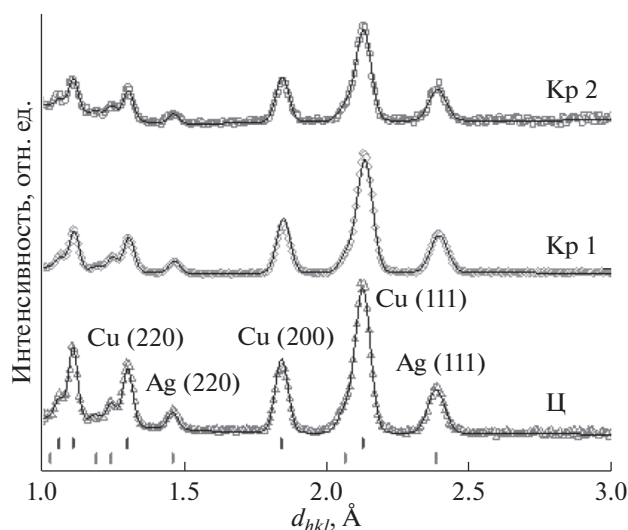


Рис. 2. Нейтронные дифракционные спектры мультидирхема, полученные для различных участков этой монеты. Представлены экспериментальные точки и рассчитанный по методу Ритвелда профиль. Вертикальные штрихи соответствуют рассчитанным положениям дифракционных пиков для кубических фаз меди (верхний ряд) и серебра (нижний ряд). Спектры соответствуют определенным участкам исследуемой монеты (см. обозначения на рис. 1 и в тексте). Отмечено несколько дифракционных рефлексов и соответствующих им индексов Миллера для фаз меди, и серебра.

тически на порядок больше, чем соответствующий коэффициент для меди: $\Sigma_{\text{Cu}} = 0.09 \text{ см}^{-1}$. В этом случае ожидается формирование хорошего радиографического контраста в экспериментах по нейтронной радиографии и томографии.

На рис. 3а представлена восстановленная из данных нейтронной томографии трехмерная модель исследуемой монеты. При анализе полученной трехмерной модели, учитывая малую толщину монеты и эффекты, связанные с повышенным поглощением нейтронов на поверхности монеты из-за наличия патины и внешних загрязнений, было обнаружено неравномерное распределение соответствующих объемов с большим содержанием серебра и объемов, характеризующихся доминирующим содержанием меди.

Таблица 1. Полученные из данных нейтронной дифракции объемные содержания меди и серебра для различных участков мультидирхема

| Участок монеты | Содержание меди, % | Содержание серебра, % |
|----------------|--------------------|-----------------------|
| Ц | 49.5(2) | 50.4(2) |
| Кр1 | 51.0(2) | 48.9(2) |
| Кр2 | 50.4(2) | 49.5(3) |
| Кр3 | 51.9(2) | 48.1(3) |

нирующим содержанием меди. Следует отметить, что в соответствии с данными нейтронной дифракции, различие в относительных объемах этих участков монеты не превышает нескольких процентов (табл. 1). Для оценки относительных объемов, занимаемых серебряной и медной компонентой, была выполнена процедура сегментации [40, 41] трехмерных нейтронных данных, в результате которой из всего объема трехмерной модели выделялись области монеты, характеризующиеся повышенным содержанием серебра. Пространственное распределение этих областей в объеме монеты представлено на рис. 3б. Было установлено, что весь объем трехмерной модели монеты формируется 59868460 вокселями, что соответствует объему 8417.98 мм³. Рассчитанный объем монеты обогащенный серебром состоит из 32232288 вокселей или 4532.11 мм³ или 53.8% от общего объема монеты. Хотя разделение объемов серебряной и медной фаз в методе нейтронной томографии носит исключительно оценочный характер, полученные значения хорошо согласуются с данными, полученными в экспериментах по нейтронной дифракции (табл. 1).

Несколько поперечных и продольных виртуальных срезов, восстановленных из нейтронных томографических данных, трехмерной модели мультидирхема представлены на рис. 3в–3д. Видно, что максимальное ослабление нейтронного пучка, а значит и доминирующее содержание серебра, наблюдается для участков монеты около ее скола и в верхнем участке монеты “Кр1”. Соответствующие края монеты, один из которых соответствует участку “Кр3”, характеризуются повышенным содержанием меди (табл. 1).

Механизмы формирования неравномерного пространственного распределения серебряной и медной компонент в объеме исследуемого мультидирхема не ясны. Данные по нейтронной томографии указывают на явно объемный характер вариации состава химических компонентов монеты (рис. 3в и 3г), что не характерно для процессов ликвации серебра, имеющих исключительно поверхностный характер [11, 16]. В то же время на участках около скола монеты наблюдается доминирование серебряной компоненты, что может быть связано с дополнительной химической обработкой монеты [42] другими исследователями. Мы можем предположить, что объемная вариация химического состава мультидирхема может быть связана с особенностями состава медно-серебряной руды [13, 29] или процессами ее расплава при чеканке.

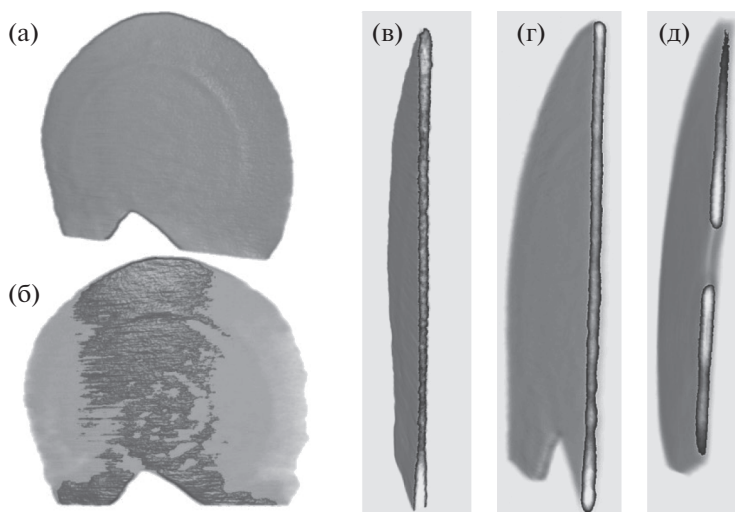


Рис. 3. Трехмерная модель исследуемого мультидирхема, восстановленная из данных нейтронной томографии (а) и выделенная из трехмерных данных область монеты с повышенным содержанием серебра (б). Более светлые участки соответствуют максимальному коэффициенту ослабления нейтронного пучка или областям с высокой концентрацией серебра. Более темные области характеризуют низкое сечение полного поглощения нейтронов, что соответствует областям с высоким содержанием меди. Представлены продольные виртуальные срезы восстановленной трехмерной модели исследуемого мультидирхема, соответствующие участкам монеты “Ц” и “Кр1” (в) и участка “Кр3” (г) и поперечный виртуальный срез трехмерной модели мультидирхема в районе скола “Кр2” (д).

Нейтронные исследования серебряного дирхема Булат-Тимура

Малый размер этой монеты не позволил просканировать различные ее участки, поэтому нейтронные дифракционные данные получены для всего объема исследуемой монеты. На рис. 4 пред-

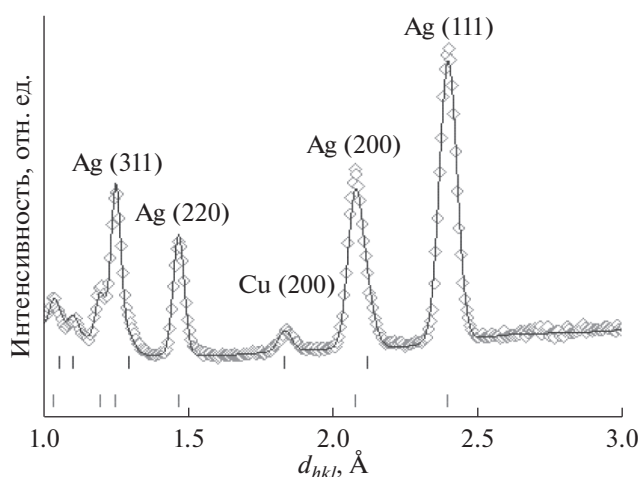


Рис. 4. Нейтронный дифракционный спектр серебряного дирхема Булат-Тимура. Представлены экспериментальные точки и рассчитанный по методу Ритвельда профиль. Вертикальные штрихи соответствуют рассчитанным положениям дифракционных пиков для кубических фазы меди (верхний ряд) и серебра (нижний ряд). Отмечены дифракционные рефлексы и соответствующие им индексы Миллера для фаз меди и серебра.

ставлен нейтронный дифракционный спектр монеты Булат-Тимура. Видно, что в случае этого дирхема фаза серебра является доминирующей во всем объеме монеты. Наблюдается только слабый рефлекс на $d_{hkl} \sim 1.8 \text{ \AA}$, который соответствует дифракционному пику (200) кубической фазы меди. Из анализа нейтронных дифракционных данных рассчитано объемное содержание серебра и меди в материале дирхема: 94.8(3)% серебра и 5.2(1)% меди. Рассчитанная масса меди в монете составила 0.04 г, а серебра 0.89 г.

Для исследования внутреннего строения дирхема были проведены эксперименты по нейтрон-

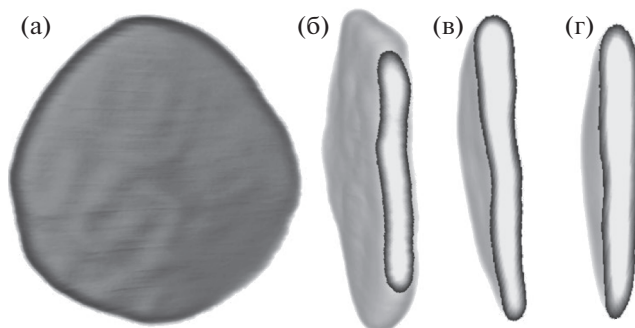


Рис. 5. Трехмерная модель серебряного дирхема Булат-Тимура, восстановленная из данных нейтронной томографии (а). Представлены продольные виртуальные срезы восстановленной трехмерной модели, соответствующие тонкому краю монеты (б), середине монеты (в) и толстому краю монеты (г).

ной радиографии и томографии. На рис. 5 представлены восстановленная из данных нейтронной томографии трехмерная модель дирхема Булат-Тимура и несколько виртуальных поперечных срезов монеты. Нейтронные данные указывают на равномерное распределение серебра в материале монеты. Пространственная локализация медной фазы не была установлена из-за малой концентрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами неразрушающей структурной диагностики – нейтронной дифракции и нейтронной томографии – исследованы монеты различных временных периодов развития средневековой Волжской Болгарии. Установлено, что обе исследованные монеты состоят из медно-серебряного сплава. Однако, для мультидирхема саманидов, датированного X веком, характерно очень высокое содержание меди – в среднем около 50% от общего объема материала монеты. Пространственное распределение серебра и меди в этой монете неоднородно, что может быть связано как с особенностями исходной руды, так и с процессами при чеканке монеты. Характерных для процессов ликвации – выделений высокой концентрации серебра на поверхности монеты не обнаружено. В отличие от мультидирхема, дирхем времен правления эмира Булат-Тимура (конец XIV в.) практически полностью состоит из серебра. Объемное содержание меди в этой исследуемой монете крайне низкое – 5.2%. Данные по составу этой монеты вполне согласуются с результатами исследований золотоордынских монет указанного периода [43].

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследователи выражают благодарность А.И. Бугарчеву и Д.Г. Мухаметшину за нумизматическую идентификацию монет, а также Музею Археологии Республики Татарстан в лице А.С. Мухаметшиной за предоставленный материал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Janssens K.H.A., Grieken R. van (René)*. Non-Destructive Microanalysis of Cultural Heritage Materials. Elsevier, 2004. 800 p.
2. *Lang J., Middleton A.* Radiography of Cultural Material. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 198 p.
3. *Griesser M., Traum R., Vondrovec K. et al.* // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2012. V. 37. № 1. P. 5. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/37/1/012011>
4. *Bugoi R., Constantinescu B., Constantin F. et al.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. 1999. V. 242. № 3. P. 777. <https://doi.org/10.1007/BF02347394>
5. *Debernardi P., Corsi J., Angelini I. et al.* // Archaeol. Anthropol. Sci. 2018. V. 10. № 7. P. 1585. <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0464-y>
6. *Kichanov S.E., Nazarov K., Kozlenko D.P. et al.* // J. Surf. Investig.: X-Ray, Synchrotron and Neutron Tech. 2017. V. 11. № 3. P. 585. <https://doi.org/10.1134/S1027451017030296>
7. *Zwicker U., Oddy A.* Metal Plating and Patination. Butterworth-Heinemann, 1993. P. 223. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1611-9.50024-8>
8. *Nørgaard H.W.* // J. Archaeological Science. 2015. V. 64. P. 110. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.10.005>
9. *Corsi J., Grazzi F., Lo Giudice A. et al.* // Microchemical J. 2016. V. 126. P. 501. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.01.006>
10. *Siouris I.M., Katsavounis S., Kockelmann W.* // J. Phys. Conf. Ser. IOP Publishing, 2012. V. 340. № 1. P. 8. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/340/1/012112>
11. *Абрамзон М.Г., Сапрыкина И.А., Кичанов С.Е. и др.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 2. С. 24. <https://doi.org/10.7868/S0207352818020038>
12. *Шайхутдинова Е.Ф., Храмченкова Р.Х., Сутди-ков А.Г.* // Нумизматика Золотой Орды. 2016. № 6. С. 113.
13. *Khramchenkova R.Kh., Shaykhutdinova, E.F., Begovatov E.A. et al.* // Povolzhskaya Arkheologiya (The Volga River Reg. Archaeol.). 2015. V. 3. № 13. P. 176.
14. *Sodaei B., Hajivaliei M., Khademi Nadooshan F.* // Mediterranean Archaeology and Archaeometry. 2013. V. 13. № 1. P. 161.
15. *Mezzasalma A.M., Mondio G., Serafino T. et al.* // Mediterranean Archaeology and Archaeometry. 2009. V. 9. № 2. P. 15.
16. *Beck L., Bosonnet S., Reveillon S. et al.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 2004. V. 226, № 1–2. P. 153. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.06.044>
17. *Ingo G.M., Balbi S., de Caro T. et al.* // Appl. Phys. A. 2006. V. 83. № 4. P. 493. <https://doi.org/10.1007/s00339-006-3533-0>
18. *Weber G., Guillaume J., Garnir H.P. et al.* // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 2000. V. 161. P. 724. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00948-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00948-9)
19. *Tate J.* // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 1986. V. 14. № 1. P. 20. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(86\)90417-9](https://doi.org/10.1016/0168-583X(86)90417-9)
20. *Caridi F., Torrisi L., Cutroneo M. et al.* // Appl. Surf. Sci. 2013. V. 272. P. 82. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.02.071>
21. *Šmit Ž., Kos P.* // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 1984. V. 3. № 1–3. P. 416. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(84\)90409-9](https://doi.org/10.1016/0168-583X(84)90409-9)
22. *Meyer M.-A., Demortier G.* // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. 1990. V. 49. № 1–4. P. 300. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(90\)90264-U](https://doi.org/10.1016/0168-583X(90)90264-U)

23. *Khramchenkova R., Safina I., Drobyshev S. et al.* // *Advanced Nanomaterials*. 2019. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/C2017-0-00296-3>
24. *Khramchenkova R., Shaykhutdinova E., Bugarchev A. et al.* // *Acta Imeko*. 2017. V. 6. № 3. P. 94.
https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v6i3.463
25. *Salvemini F., Olsen S.R., Luzin V. et al.* // *Mater. Charact.* 2016. V. 118. P. 175.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.05.018>
26. *Кропоткин В.В.* Торговые связи Волжской Булгарии в X в. по нумизматическим данным. М.: Наука, 1970. 147 с.
27. *Фахрутдинов Р.Г.* Очерки по истории Волжской Булгарии. М.: Наука, 1984. 8 с.
28. *Нунан Т.С.* // *Археология, история, нумизматика, этнография Восточной Европы. Сборник статей памяти В.И. Дубова*. 2004. С. 256.
29. *Begovatov E., Lebedev V., Khramchenkova R.* // *Povolzhskaya Arkheologiya (The Volga River Reg. Archaeol.)*. 2013. V. 3. № 5. P. 169.
<https://doi.org/10.24852/pa2013.3.5.169.174>
30. *Begovatov E., Kazakov E., Mukhametshin D., Singatullina A.* // *Povolzhskaya Arkheologiya (The Volga River Reg. Archaeol.)*. 2013. V. 4. № 6. P. 47.
<https://doi.org/10.24852/pa2013.4.6.47.63>
31. *Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Lukin E., Savenko B.N.* // *Crystals*. 2018. V. 8. № 8. P. 331.
<https://doi.org/10.3390/cryst8080331>
32. *Rodríguez-Carvajal J.* // *Phys. B Condens. Matter*. 1993. V. 192. № 1–2. P. 55.
[https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90108-I](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-I)
33. *Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Lukin E. et al.* // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2016. V. 13. № 3. P. 346.
<https://doi.org/10.1134/S1547477116030146>
34. *Kozlenko D.P., Kichanov S.E., Lukin E. et al.* // *Phys. Procedia*. 2015. V. 69. P. 87.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.07.012>
35. *Lehmann E., Mannes D., Kaestner A., Grünzweig C.* // *Phys. Procedia*. 2017. V. 88. P. 5.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.06.055>
36. *Rant J.J., Milič Z., Turk P., Lengar I.* // *The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing*. 2005. P. 181.
37. *Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W.* // *Nat. Methods*. 2012. V. 9. № 7. P. 671.
<https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
38. *Chen R.-C., Dreossi D., Mancini L. et al.* // *J. Synchrotron Radiat.* 2012. V. 19. № 5. P. 836.
<https://doi.org/10.1107/S0909049512029731>
39. *Sears V.F.* // *Neutron News*. 1992. V. 3. № 3. P. 26.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398374-9.09989-7>
40. *Otsu N.A.* // *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* 1979. V. 9. № 1. P. 62.
<https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
41. *Kichanov S.E., Kozlenko D.P., Lukin E. et al.* // *Meteorit. Planet. Sci.* 2018. № 53. P. 2155.
<https://doi.org/10.1111/maps.13115>
42. *Hall E.T., Metcalf D.M.* *Methods of chemical and metallurgical investigation of ancient coinage*. Royal Numismatic Society, 1972. 446 p.
43. *Шайхутдинова Е.Ф., Храмченкова Р.Х., Бакиров Б.А.* // *Археология евразийских степей*. 2018. № 5. С. 243.

Studies of Coins of Medieval Volga Bulgaria by Neutron Diffraction and Tomography

**B. A. Bakirov^{1, 2, *}, S. E. Kichanov^{2, **}, R. Kh. Khramchenkova^{1, 3}, A. V. Belushkin^{1, 2, 4},
D. P. Kozlenko², A. G. Sitdikov^{1, 3}**

¹*Kazan (Volga Region) Federal University, Republic of Tatarstan, Kazan, 420008 Russia*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia*

³*Institute of Archeology. O.H. Khalikov, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Republic of Tatarstan, Kazan, 420012 Russia*

⁴*Dubna State University, Dubna, 141980 Russia*

**e-mail: bulatbakirov4795@gmail.com*

***e-mail: ekich@nfjnr.ru*

The phase composition and spatial distribution of chemical components in the volume of coins of medieval Volga Bulgaria were studied using neutron diffraction and neutron tomography. Two coins belonging to different time periods of this medieval state were studied: the Samanid multidirham, dating from the first half of the 10th century; and silver dirham during the reign of the Bulgarian Bulat-Timur emir. It was established that both coins consist of a copper-silver alloy. In the Samanid multidirham the average volume content of copper and silver was about 50%. Minor spatial variations in chemical composition were found in the volume of the multidirham under study. It was established that the volume average silver content in Bulat-Timur dirham is about 95%.

Keywords: methods of non-destructive testing, coins of Volga Bulgaria, neutron diffraction, neutron tomography, cultural heritage.