

УДК 001.89+004.912

АРХЕОМЕТРИЯ МЕДНЫХ МОНЕТ ЗОЛОТООРДЫНСКОГО ВРЕМЕНИ С БОЛГАРСКОГО ГОРОДИЩА КАК ИНСТРУМЕНТ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Р. Х. Храмченкова¹ [0000-0001-9598-2024], Д. Г. Мухаметшин² [0009-0003-9879-1866],
А. А. Елизаров³ [0000-0001-6324-4609], А. Г. Ситдииков⁴ [0000-0001-6314-3568],
П. В. Федан⁵ [0000-0002-1457-4203]

^{1, 2, 4}*Институт археологии им. А. Х. Халикова Академии наук Республики
Татарстан, г. Казань, Россия*

^{3, 5}*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

¹rkhramch@gmail.com, ²djamil78@list.ru, ³artelizar@gmail.com,

⁴sitdikov_a@mail.ru, ⁵pavel.fedan@mail.ru

Аннотация

Представлена пионерская работа в области изучения химического состава на микропримесном уровне медных археологических монет как информационной основы для выявления особенностей денежного обращения в средневековом государстве.

Проведено междисциплинарное исследование нумизматического материала с Болгарского городища из 98 медных монет, представленного 91 золотоордынской, шестью иноземными монетами того же периода и одной монетой домонгольского времени династии Зенгидов. Статья содержит атрибуцию с изображениями аверса и реверса монет, а также данные археометрического изучения денежных артефактов на предмет химического состава двумя независимыми методами – рентгенофлуоресцентным и эмиссионным спектральным.

На настоящий момент это первое междисциплинарное исследование в нашей стране, охватившее представительную коллекцию медных денег различных правителей и монетных дворов из археологических материалов Болгарского городища. В результате изучения химического состава монет были определены соотношения примесей в медных сплавах, что позволило разделить коллекцию на десять основных групп, включающих монеты различных чеканных

дворов и правителей определенной датировки. Определение примесного состава позволяет не только классифицировать монеты по группам, но и выдвигать обоснованные гипотезы о географическом расположении месторождений меди, использовавшейся для чеканки.

База данных, сформированная по результатам исследования и объединяющая нумизматическую атрибуцию, изображения монет и данные об их химическом составе, опубликована как открытый набор данных в репозитории Zenodo и предназначена для применения методов машинного обучения и искусственного интеллекта в задачах автоматической идентификации и провениенс-анализа средневековых монет.

Ключевые слова: медные монеты династии Джучидов, химический состав, нумизматические данные, Болгарское городище, эмиссионный спектральный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, провениенс-анализ, археологические датасеты, машинное обучение, цифровая нумизматика.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых аспектов изучения медных монет является определение их примесного состава. Как показывает опыт мировой археометаллургии, анализ микропримесей в меди позволяет реконструировать источники рудного сырья, использовавшегося при чеканке монет. Фундаментальный принцип провениенс-анализа состоит в том, что элементы-примеси в медных сплавах разделяются на «провениенс-зависимые» (As, Sb, Ag, Bi, Co, Ni, Se, Te), отражающие геохимические характеристики исходного рудного месторождения, и «технологически-зависимые», изменяющиеся в процессе плавки и литья [1]. Каждый генетический тип медных руд обладает специфическим набором элементов-спутников: так, повышенные концентрации никеля и кобальта указывают на медно-никелевые сульфидные месторождения, присутствие золота, свинца, мышьяка и сурьмы свидетельствует о жильных кварц-сульфидных полиметаллических рудах гидротермального происхождения, а олово в сочетании с мышьяком может указывать на медно-оловянные образования [2]. Дополнительным инструментом выступает изотопный анализ свинца (LIA), позволяющий связывать металл артефактов с конкретными рудными районами посредством сравнения с базами

данных геохимических характеристик месторождений, такими как GlobalID [3] и OXALID. Успешные примеры провениенс-анализа медных монет продемонстрированы для раннеримских медных монет, где изотопами Cu и Pb была прослежена смена источников меди от Сардинии и Юго-Восточной Испании при Августе к рудникам Рио-Тинто и Кипра при Тиберии [4], а также для раннеисламских дирхамов Омейядов и Аббасидов, где изотопный анализ показал переход от рециклинга сасанидского серебра к рудникам Тавра [5]. Между тем для золотоордынских медных монет подобные исследования практически не проводились, что делает настоящую работу особенно актуальной.

Представление результатов исследований в форме научной статьи может содержать множество утверждений различной природы – от методологических описаний до ключевых научных выводов, от воспроизведения общеизвестных фактов до новаторских гипотез. Это в полной мере касается работ с данными о химическом составе артефактов. Но цитирование такой публикации целиком не позволит различить, какие именно содержащиеся в ней утверждения признаются, используются, критикуются или игнорируются последующими исследователями. В случае же аналитических данных можно говорить о базовых единицах как об объектах, которые смогут использовать в своих изысканиях ученые как гуманитарных, так и естественных наук.

В последние годы методы искусственного интеллекта и машинного обучения получают все более широкое применение в археологии, нумизматике и геологоразведке. В нумизматических исследованиях разрабатываются нейросетевые подходы к автоматической классификации монет по изображениям и распознаванию древних надписей [6–9], что существенно ускоряет обработку массовых археологических находок. В геологоразведке методы глубокого обучения успешно применяются для прогнозирования местоположения рудных месторождений на основе геохимических и геофизических данных [10, 11]. Особый интерес для археометрии представляет комбинирование результатов химического анализа артефактов с алгоритмами машинного обучения, что открывает новые возможности для провениенс-анализа [12, 13]. Эти достижения формируют перспективу применения аналогичных подходов к золотоордынскому ну-

нумизматическому материалу, однако для этого необходимо создание специализированных датасетов, объединяющих изображения монет и данные об их химическом составе. Открытый датасет, подготовленный в рамках настоящей работы и объединяющий нумизматическую атрибуцию, фотографии и результаты количественного химического анализа 98 медных монет золотоордынского периода [14], является первым шагом в этом направлении исследований.

НУМИЗМАТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Настоящая работа посвящена изучению большого комплекса медных монет времен Золотой Орды. Для анализа был отобран полный набор по разнообразию денежного материала, представляющего различных правителей. С целью расширения исследуемой коллекции по времени и монетным дворам, а также в качестве сравнительного материала в аналитическую выборку были также включены случайные находки с Болгарского, Танкеевского и Царевского городищ из фондов Болгарского государственного историко-архитектурного музея-заповедника (БГИ-АМЗ) (<https://vbolgar.ru/>) и Музея археологии Республики Татарстан (МАРТ) (<http://archtat.ru/muzej-arheologii-respubliki-tatarstan/>). Золотоордынские монеты, представленные в настоящих исследованиях, в полной мере отражают медные чеканы всех правителей Золотой Орды, а надчеканенные монеты составляют практически полный спектр материалов, найденных в Болгаре.

Всего было взято 98 медных монет интересующего нас времени различных монетных дворов – Болгар, Сарай, Сарай ал-Джадида, Мохши, Барджин, Гулистан, Орду, Хаджи-Тархан, из них 91 монета – золотоордынская, в том числе две анонимных отчеканенных в Крыму и 7 иноземных, среди которых одна монета – домонгольского времени сельджукской династии Зенгидов с Ближнего Востока.

Основу проанализированной выборки составили нумизматические находки раскопа 199 (руководители А. Г. Ситдилов и С. Г. Бочаров), где были обнаружены 622 монеты (42 серебряные и 580 медных). Из коллекции раскопа было отобрано для исследования 60 монет из медного сплава. Выбор этих монет из данного раскопа неслучаен по ряду причин. Монеты Токтамыша, встречающиеся в Болгаре, имеют надчекан, чистые монеты крайне редки. На Селитренном городище (https://ru.wikipedia.org/wiki/Селитренное_городище) ненадчеканенные монеты времени Токтамыша составляют 7.51% от общего числа найденных медных денег

[15], в Бельджаминах их 2.9% [16], а в случае раскопа 199 их более 11%. Таким образом, немаркированные (чистые) монеты Токтамыша, выявленные в большом количестве, – нетипичное явление. Необходимо отметить также типологическое разнообразие монет этого раскопа – 34 типа. Среди них обнаружены деньги, чеканенные в Сарае, Сарай ал-Джадиде, Орде, Орду-Базари, Орду ал-Муаззам, а также анэпиграфные монеты и монеты без указания места и года чекана.

Важно отметить и тот факт, что надчеканенные монеты с «лировидной тамгой» рубежа XIV-XV вв. составляют 80% от всех надчеканенных монет, обнаруженных в раскопе. В большинстве раскопок центральной части Болгара и на его окраинах финальными являются монеты Мурида и анонимные монеты Гулистан середины 60-х годов XIV в.

Другим отличительным фактом служит то, что в раскопе было найдено около 50 монет Али-Дервиша, более 60 монет с лировидной тамгой, а также обнаружена заготовка для чеканки монет Али-Дервиша. Таких монет на территории Болгарского улуса немного, за пределами улуса их нет совсем. Монеты Али-Дервиша, представляющие особый интерес, чеканились до правления Шадибек хана (1400–1407), а монеты с лировидной тамгой были в обращении вплоть до 20-х годов XV в. Монеты Али-Дервиша, крайне редко встречающиеся даже в Болгаре, составляют 7.40% от общего числа монет раскопа, а надчеканенные монеты – 22.55%, причем в раскопе 199 монеты Али-Дервиша обнаружены в нескольких вариантах. Несмотря на то что в литературе существуют различные варианты чтения легенды монеты как «Али, Сарай», чтение легенды как «Али-Дервиш» бесспорно, так же, как и место их чеканки, – Болгар. Кроме того, среди находок имеется еще 6 заготовок (расплющенные и нерасплющенные) для чеканки монет. Эти факты могут свидетельствовать о присутствии в конце XIV в. на территории раскопа чеканного двора Болгара.

Как было отмечено выше, в качестве образцов сравнения в изученную коллекцию было включено семь зарубежных монет: три иранские монеты (№ 2/1, 2/4, 2/5), две египетские монеты (№ 97, 98) и один неопределяемый пул (№ 129/380), относящиеся к золотоордынскому периоду. Иноземные медные деньги – ранняя монета Зенгидов (№ 2/1) – крайне редко встречаются на золотоордын-

ских памятниках, но поскольку она была найдена на территории Болгарского археологического памятника, сравнение состава металла этой монеты с другими также представляет интерес. Можно отметить, что эта монета практически не описана в публикациях, поэтому точная атрибуция затруднительна. В опубликованном датасете [14] приведены фотографии и нумизматическое описание монет (в случае однотипности монет дано только одно описание).

Количественное распределение монет характеризуется следующим образом: Болгар – 4 анонимных, 2 Менгу Каан, 2 Насир ад-Дин Аллах; Гулистан – 1 анонимная, 7 Хызр хан; Сарай ал-Джадида – 14 анонимных, 4 Тулумбек ханум, 1 Хайр Пулад; Сарай – 8 анонимных; Сарай ал-Махруса – 1 подражание Болгар; Ас-Сарай – 2 анонимных; Орду – 5 анонимных; Орду ал-Муаззам – 1 анонимная; Хорезм? – 2 анонимных; Мохши – 2 анонимных; Хаджи Тархан – 2 анонимных, 1 Черкес Бек; Крым – 2 анонимных; Барджин – 2 анонимных.

Кроме того, в аналитическую выборку включены 6 монет Али-Дервиш, 2 анэпиграфные монеты, 16 надчеканенных анонимных с различным рисунком и 2 монетные заготовки.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Наряду с нумизматическим анализом и описанием медных монет с Болгарского городища было проведено исследование их химического состава с последующей статистической обработкой данных. В качестве методов археометрического изучения были выбраны две независимые аналитические технологии: эмиссионный спектральный (ЭСА) и рентгенофлуоресцентный (XRF) анализы. 98 медных монет было изучено традиционным методом ЭСА, дающим в настоящее время максимально возможный спектр микропримесей. Методика анализа подробно описана в [17]. 88 образцов были исследованы дополнительно XRF-методом на поликапиллярном микро-рентгенофлуоресцентном спектрометре M4 Tornado и спектрометре Mistral фирмы Bruker [18].

Выбор двух независимых аналитических методов обусловлен необходимостью верификации данных и обеспечения максимально широкого спектра определяемых элементов. Именно определение микропримесей является ключевым

для решения задачи провениенс-анализа – установления связи между химическим составом металла монеты и геохимическими характеристиками конкретного рудного месторождения. Как показывают исследования Э. Перницки [1], в рамках масштабного проекта SAM (Studien zu den Anfängen der Metallurgie), охватившего более 22000 доисторических металлических объектов по 10 элементам, именно набор микроэлементов Au, Ag, As, Sb, Bi, Ni, Co, Sn, Pb позволяет с наибольшей надежностью «отпечатать» рудный источник в составе металла. При этом необходимо учитывать, что процессы плавки, рафинирования и легирования могут существенно изменять концентрации отдельных элементов, поэтому наибольшую диагностическую ценность имеют соотношения «провениенс-зависимых» элементов, таких как Au/Ag, Ni/Co, As/Sb [1, 3].

Полные данные исследований химического состава представлены в опубликованном датасете [14]; в столбцах химического состава результаты, полученные XRF-методом, приведены через дробную черту. К сожалению, чувствительность метода не позволила определить все элементы, выявленные ЭСА. Сопоставление значений, полученных примененными методами, показало для большей части артефактов удовлетворительную сходимость по содержанию компонентов. Выявленные расхождения вполне объяснимы особенностями экспрессного XRF-метода, предъявляющего особые требования к поверхности анализируемого образца. В случае неровной поверхности исследуемой области показания прибора могут различаться на несколько порядков. Необходимо принять во внимание также тот факт, что чувствительность XRF низкая и не превышает значений 0.01% для большинства элементов. Этим объясняется и заметное различие в концентрации меди с закономерно большими значениями ЭСА в связи с невыявленными примесями (анализ включает пересчет содержаний элементов на 100%), которые определил этот метод.

Поскольку металл нумизматического материала показал достаточно большое разнообразие по содержанию примесей в меди, были проведены статистическая обработка и сравнительный анализ всех данных. В связи с особенностями XRF-метода, отмеченными выше, были использованы только результаты, полученные эмиссионной спектроскопией.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью статистического анализа данных по медным монетам Болгарского городища установлено несколько групп с характерным соотношением элементов-примесей. В табл. 1 представлено распределение монет по группам согласно химическому составу.

Дано также описание определяющих микроэлементов для каждой группы и указан перечень монет, вошедших в нее. В скобках приведено общее количество исследованных монет, относящихся к данной нумизматической группе.

Группа 1. Характерной особенностью монет этой группы являются высокие значения золота Au: 0.01–0.18%, никеля Ni: 0.01–0.25% и сурьмы Sb: 0.1–2.0%. В нее вошли обе монеты Насир ад-Дин Аллах (2) 1240-е гг. и 1270-е гг. (№ 5/1, 5/2) Менгу Каан (2) 1250-е гг., все монеты болгарского чекана XIII в. (№ 3/8). В этой же группе находится самая ранняя из выборки монета династии Зенгидов (1) 1149–1170 гг., взятая в качестве сравнительного материала (№ 2/3), также одна из монет Али-Дервиш (6) – надчекан «лировидная тамга» – самая поздняя в выборке 1407–1419 гг. (№ 4744). Такой же состав имеют две монеты Хызр хан чекана Гулистан 1361–1362 (8) (№ 30, 3/1), четыре монеты чекана Сарай ал-Джадида (19) – две Тулумбек ханум 1371–1372 гг. (№ 99/766, 299), Хайр Пулад 1362–1363 гг. (№ 28), анонимные пулы «секира вправо» (№ 25/3519) и «павлин» (№ 131/512), анонимная Сарая 1385 г. (№ 58) и анонимный пул (дракон) 1380–1390 гг. (№ 189/699), анонимные монеты 1370–1390 гг. (№ 188/782, 60, 170/668, 281/1284). В этой же группе – одна из заготовок для монеты (№ 196/644). Таким образом, эта группа характеризуется большим хронологическим разбросом времени изготовления монет, охватывающим практически весь описываемый период от начала XII (Зенгиды) до начала XV в. (Али-Дервиш).

Табл. 1. Соотношение элементов-примесей в металле монет.

Группа	As, %s	Au, %	Bi, %	Co, %	Ni, %	Sb, %	Sn, %	Zn, %
1	> 0.06	0.005–0.18	> 0.001	< 0.004	0.012–0.25			
1a					0.0036–0.086			

2		0.0008– 0.0034			0.025– 0.089		< 0.1	
3		0.0001– 0.0054			0.002– 0.0094			
4		0.0018– 0.0083			0.0032– 0.065	< 0.046	0.083– 0.97	
5		0.013– 0.32			0.0068– 0.064		0.1– 1.24	
6		0.014– 0.042			0.002– 0.008	0.034– 0.23	< 0.08	
7		0.035– 0.057			0.014– 0.044	0.19– 0.25	< 0.02	
8	1.19– 2.64	0.0095– 0.071	0.00016– 0.00048	0.024– 0.031	0.14– 0.16	0.032– 0.089	0.018– 0.076	< 0.02
9	0.98– 1.86	<0.0052	0.036– 0.13	0.0018– 0.0026	0.031– 0.39	0.67– 1.18	0.069– 0.32	
10	0.004– 0.73	0.0018– 0.049	0.042– 0.004	0.001– 0.0057	0.001– 0.0057	0.009– 1.08	0.0084– 0.091	
11	0.0082– 0.0091	< 0.0001	0.0007– 0.00082	0.13– 0.0019	0.022	0.058– 0.06	0.002– 0.32	0.078– 0.088
12	0.043– 0.55	0.0003– 0.0051	0.013– 0.054	0.0004– 0.0085	0.002– 0.045	0.12– 0.24	2.07– 8.65	0.093– 0.35

Группа 1а. Состав металла монет этой группы схож с первой, но представлен несколько меньшими, чем в группе 1, значениями никеля Ni: 0.004–0.009%. В эту группу вошли три надчеканенные монеты Хызр хан Гулистан (8) 1361–1362 гг. (№ 282/1206, 280/695, 127) и одна монета с надчеканкой «лировидная тамга» 1380–1390 гг. (№ 296/1324). Принципиально, что значения никеля 0.007–0.009% допускают ошибку определения 0.002–0.003%, поэтому можно считать, что металл групп 1 и 1а имеет один и тот же характер.

Группа 2. Монеты этой группы имеют низкую концентрацию золота Au: 0.0008–0.001%, но высокие показатели никеля Ni: 0.012–0.089%. В составе этой

разновременной группы находятся одна монета Менгу Каан (2) Болгар 1251–1259 гг. (№ 5/3), две монеты Хызр хан Гулистан (8) 1361–1362 гг. (№ 98/713, 5/13) анонимная Сарай 1385 г. (№ 69) и анонимная «две рыбы» 1380–1390 гг. (№ 189/175). Можно отметить, что эта группа характеризуется таким же широким временным интервалом, что и первые группы.

Группа 3. Монетам этой группы свойственна средняя концентрация золота Au: 0.0002–0.007%, а никеля в меди меньше на порядок Ni: 0.002–0.004% и в среднем содержание мышьяка также меньше As: 0.06–0.3%. Эту группу составили две монеты «лев и солнце» одна чекана Сарай (8) 1330-е гг. (№ 2/14, 5/7), другая без места и года (№ 5/7), Барджин (2) 1352 г. (№ 2/8), Мохши (2) 1357 г. (№ 2/9), анонимная «розетка» 1351–1352 гг. (№ 2/11), анонимная «павлин» 1370-е гг. (№ 19/3804), анонимная Сарай ал-Джадида (19) надчекан 1379–1380 гг. и анонимный пул (розетка) (№ 31). Время изготовления монет этой группы 1330–1380 гг. (№ 77/447).

Группа 4. Низкие значения золота характерны для металла монет этой группы Au: 0.002–0.009%, однако установлено значительное содержание олова Sn: 0.1–0.9%. Эту группу составили анонимная монета подражание двуглавному орлу 1340-е гг. (№ 2/12), анонимная Барджин (2) 1352 г. (№ 267/1281), две анэпиграфные надчеканенные монеты 1370 г. (№ 2751, 111), четыре монеты чекана Сарай ал-Джадида (19): «двуглавый орел» 1340-е гг. (№ 2/13), анонимные 1370-е гг. (№ 173/603) и 1379–1380 гг. (№ 68/441), Тулунбек ханум (4) 1371–1372 гг. (№ 2/10), надчекан Сарай (8) «лировидная тамга» (кувшин) 1380-е гг. (№ 4746), две анонимные Орду (5) 1370-е гг. (№ 174/666) и 1383–1384 гг. (№ 12/667), Али-Дервиш (6) конец XIV – начало XV в. (№ 5/15). Временной диапазон группы – от 1340-х гг. по конец XIV – начало XV в.

Группа 5. Монеты этой группы показывают высокую концентрацию золота Au: 0.01–0.1% и олова Sn: 0.1–1.5%. В нее вошли две анонимные монеты 1370 гг. и анонимные: Мохши (2) «розетка» 1357 г. (№ 290/1030), пул неопределимый с надчеканкой в виде буквы «П» (№ 20), одна монета Сарай ал-Джадида (19) надчекан «зафар» 1366–1367 гг. (№ 276), две монеты Орду (5) 1383 г. (№ 169/665) и 1390 г. (№ 18/3236), две монеты Сарай (8) надчекан «лировидная тамга» 1385 г. (№ 118) и 1359–60 гг. (№ 128/135), два надчекана «лировидная тамга» Ас-Сарай

(2) 1370-е гг. (№ 23/3799) и 1387 г. (№ 140/253) и надчекан «лировидная тамга» Гулистана (8) 1362–1363 гг. (№ 307/1225). Такой же состав имеют четыре монеты (№ 216, 217, 219, 223) Али-Дервиш (8) (конец XIV – начало XV вв.), а также заготовка для монеты Али. Хронологические рамки монет этой группы достаточно узкие 1357–1390 гг. (№ 302/1382).

Группа 6. В монетах этой группы определены такое же высокое содержание золота, как и в группе 5, Au: 0.01–0.042%, но низкая концентрация олова Sn: 0.01–0.08% и никеля Ni: 0.003–0.006%. Эти показатели являются особенностью для следующих монет: две анонимные «тамга в треугольнике» 1270–1290 гг. (№ 5/4, 3/7), две анонимные монеты Сарай ал-Джадида (19) «розетка», 1350-е гг. (№ 3/2) и Тулумбек ханум (4) 1371–1372 гг. (№ 180/1172), анонимный Сарай (8) «кувшин» 1380-е гг. (№ 232/2795), надчекан «зайчик» 1380–1390 гг. (№ 20/3801). Одна из трех иранских монет (№ 2/5) вошла в химическую группу исследованных золотоордынских образцов – это монета «символ веры», датируемая XIV в. Время изготовления золотоордынских монет данной группы 1290–1390 гг.

Группа 7. Для этой группы монет показателями стали высокие значения золота Au: 0.035–0.057% при суммарно невысоких концентрациях сурьмы, мышьяка и олова Sb: 0.19–0.25%, As: 0.34–0.05%, Sn: 0.023–0.001%. Группу составили анонимный пул «тамга в треугольнике» 1270-е гг. (№ 5/5) и обе монеты крымского чекана – анонимная конца XIII века (№ 10/3360) и монета с изображением орла 1343–1344 гг. (№ 5/11). Эта небольшая группа имеет небольшой временной интервал изготовления 1290–1344 гг.

Во всех группах монет, перечисленных выше, кобальт обнаружен в следовых концентрациях не более 0.0005%.

Группа 8. Эту группу выделяет очень характерный состав монет – мало висмута Bi: 0.002–0.003%, сурьмы Sb: 0.03–0.09% и серебра Ag: 0.02–0.05%, много мышьяка As: 1.1–2.6%, кобальта Co: 0.02–0.03% и очень много никеля Ni 0.14–0.19%, что свидетельствует о специфичном месторождении меди. В группу вошли анонимный 16 пул данник 1380–1390 гг. (№ 107), иноземная монета (№ 129/380), анонимный Сарай ал-Джадид (19) 1388 г. (№ 187/799) и одна из двух монет Хорезм (?) (2) 1371–1372 гг. (№ 81/242). Хронология группы определяется 1380–1390-ми годами.

Группа 9. Медь монет этой группы имеет такие же высокие значения мышьяка As: 0.98–1.9%, но сурьмы в ней больше Sb: 0.7–1.3%, в то время как кобальта на порядок меньше Co: 0.001–0.005%. Две монеты из трех чекана Хаджи Тархан (3) – Черкес Бек 1374–1375 гг. (№ 74) и анонимная 1380–1390 гг. (№ 134/244), составили эту группу, датируя ее 1374–1390 годами.

Группа 10. Отличительная особенность этой группы монет состоит в том, что содержания практически всех микрокомпонентов в них низкие, за исключением кобальта Co: 0.001–0.006%. В группу вошли единственная монета Сарай ал-Махруса подражание Болгар 1323 г. (№ 183), три монеты чекана Болгар (8) – два анонимных пула «тамга в звезде» 1332–1336 гг. (№ 3/6, 5/9) и анонимная «решетка» 1330–1340 гг. (№ 5/10), три монеты Сарай ал-Джадида (19) – две «с двуглавым орлом» 1340-е гг. (№ 5/8, 3/3) и одна анонимная 1350-е гг. (№ 5/12). Такой же химический состав имеет анонимная «лев и солнце» Сарай 1337 г. (№ 3/4), анонимная зеркальный 1280–1290 гг. (№ 5/6) и одна монета с двуглавым орлом XIV в. (№ 2/7), анонимный пул Болгар «решетка» 1330–1340 гг. (№ 3/5). Хронологические рамки этой группы достаточно узкие – с 1290–1320 по 1350-е гг.

Практически все иноземные монеты имеют совершенно специфичный состав и образуют свои химические группы.

Группа 11. Состав меди в монетах этой группы достаточно характерен и отличается значимыми кобальтом Co: 0.02–0.13% и цинком Zn: 0.08–0.09% при очень маленьких включениях всех остальных элементов. Обе египетские монеты XIII–XIV вв. изготовлены из нее (№ 97, 98).

Группа 12. Эта группа оловянной бронзы с содержанием олова Sn: 2.1–8.7% и примесью цинка Zn: 0.1–0.35%. Две иранские монеты, одна из которых монета Хулагуиды (Иран) Улжайту (№ 2/1, 2/4) и два неопределимых пула отлиты из оловянной бронзы (№ 2/6, 2/2).

ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе междисциплинарных исследований проведена большая работа по атрибуции монет и определению их химического состава. Необходимо отметить, что в отличие от серебряных средневековых монет [19–21] анализ медных денег с Болгарского городища был проведен впервые. Научная литература по теме хи-

мического состава медных денег достаточно немногочисленная. Л. И. Шершев [22] изучил средневековые бронзовые монеты Херсонеса, Х. З. Карамбахшов с коллегами [23] определил состав медных монет с раскопов в Афганистане. Зарубежные исследования также имеют ограниченный характер и касаются в основном денег римского периода [24], эпохи Возрождения [25] и доисламского времени [26–28].

Исследование химического состава медных денег на предмет микропримесей в нашей стране является пионерским. Микропримесной состав позволяет определить некоторые особенности металлов, характеризующих изначальное рудное сырье и особенности технологического процесса. Полученные результаты статистической обработки результатов анализа химического состава выявили некоторые особенности медного материала, который использовался при изготовлении золотоордынских монет. Каждую группу составили монеты определенных чеканных дворов и правителей. Большая часть статистических групп имеет четкие, достаточно узкие временные рамки и включает вполне определенные дворы. Зарубежные монеты Ирана и Египта с особым составом составили две обособленные группы. Необходимо отметить существенные примеси свинца, сурьмы и серебра, которые (более 0.1%) характерны почти для всех групп.

Примесные характеристики металла монет как временной индикатор

Распределение монет по химическим группам хорошо согласуется с историческими данными. Монеты, атрибутированные чеканом Болгара, распределились по четырем группам, причем монеты определенного времени вошли в разные группы: наиболее ранние 1240–1250-х гг. – в группу 1, 1251–1259 гг. – в группу 2, 1323–1340-х гг. – в группу 10. Один анонимный пул конца 30-х – начала 40-х годов XIV в. вошел в группу 5. Заметим, что датировка болгарских монет XIV в. совпадает с датировкой монет схожих составов, атрибутированных другими дворами и эмитентами.

Обращает на себя внимание тот факт, что все монеты Хызр хана чекана Гулистан с датировкой 1360–1362 гг., часть из которых представлена надчеканенными монетами, имеют состав, идентичный монетам, чеканенным в Болгаре в XIII веке. Медные монеты Хызр хана чеканились в городах Сарая ал-Джадида,

Гулистан и Хорезм. Хорезмские монеты Хызр хана на территории Болгарского городища встречаются крайне редко, а монеты Сарая ал-Джадида и Гулистана относятся к разряду широко распространенных. В Болгаре монеты Сарая ал-Джадида и Гулистана встречаются в соотношении 1:2. Например, в раскопе 216 – 4 монеты Сарая ал-Джадида и 10 Гулистана; в раскопе 235 – 6 монет Сарая ал-Джадида и 11 Гулистана и др. Эти данные могут служить основанием для предположения, что город «Гулистан находился где-то в пределах Булгара, возможно, в самом Булгаре» [29]. Включение монет Насира и Мунке в одну группу с монетами Хызр хана показывает возможность чеканки монет Хызр хана на Болгарском монетном дворе штемпелями, привезенными из столичного двора.

В 60-е годы XIV в. медные монеты Хызр хана надчеканивались чеканом «хан», который принадлежал хану Абдаллаху, и чеканом «Азиз хан», принадлежащим Азиз-Шейху. Надчеканка производилась на Болгарском монетном дворе. «Хан» является наиболее ранней надчеканкой и в количественном отношении стоит на втором месте после «лировидной тамги». В период с 60-х годов XIV в. до начала XV в. Болгарский монетный двор использовал около 20 надчеканок. В это время оригинальные монеты не чеканились. На завершающем этапе хождения надчеканки с «лировидной тамгой» на рубеже XIV–XV вв. появились уже оригинальные монеты Али-Дервиша, что демонстрирует группа 5.

Значение примесного состава для идентификации месторождений меди

Определенные выводы можно сделать и относительно меди, из которой отливались монеты в различные периоды существования Золотой Орды. Идентификация исходных руд по примесному составу проводилась согласно главнейшим типам месторождений медных руд [2]. Рассмотрение металлов с точки зрения первичного сырья корректно по отношению монет первичного чекана, поэтому при дальнейших рассуждениях только они будут приниматься во внимание.

Анализ полученных данных с точки зрения провениенса рудного сырья показал, что характерные соотношения микропримесей в каждой выделенной группе могут быть соотнесены с определенными генетическими типами медных месторождений. Такой подход, широко апробированный в зарубежной археометаллургии на материале римских, греческих и раннеисламских монет [4, 5, 24],

позволяет не только классифицировать денежные артефакты, но и восстанавливать маршруты поставки рудного сырья, а значит, и торговые связи средневековых государств.

Анализ группы 1 с широким временным диапазоном показывает, что половина поздних монет представлена надчеканами. Интересно, что монета династии Зенгидов не отличается от ранних болгарских монет, хотя временной интервал между ними более 100 лет, а с самыми поздними образцами группы – около 250 лет. Поскольку в нашей выборке только одна монета этого периода, невозможно получить однозначный ответ на основе анализа данного факта. Как предположение можно указать на функционирование очень масштабного источника меди, выработка которого велась на протяжении нескольких веков. Казахстанские исследователи сообщают о подобных средневековых выработках [30]. Однако нельзя не принимать во внимание, что для производства металлических денег всегда использовали монеты, вышедшие из обращения.

Группы 1 и 1а разделились только по незначительным различиям в концентрации никеля. Вероятнее всего, на изготовление этих монет пошла руда с различных участков (пластов) одного и того же месторождения. Повышенные концентрации никеля в меди монет этих групп свойственны медно-никелевым сульфидным месторождениям, но, учитывая присутствие значимых примесей золота, свинца, мышьяка и сурьмы, можно предположить использование жильных кварц-сульфидных полиметаллических гидротермальных руд кварцевого парагенезиса. Основными формами залегания этих руд являются жильные зоны. Другим возможным источником металла этих монет могла быть медь, выплавленная в результате переработки золотосеребряных руд, в которых она выступает одной из существенных примесей. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется сопоставление полученных данных с базой GlobaLID, содержащей более 20000 записей изотопных сигнатур свинца рудных месторождений мира [3], а также с региональными изотопными характеристиками уральских и казахстанских месторождений, уже частично опубликованными в литературе.

Подражание Болгар ал-Махруса 1323 г. открывает группу монет с очень характерным составом – высоким кобальтом, концентрация которого в более ранних монетах, рассмотренных выше, на порядок ниже. Этот состав свидетельствует о выработке в качестве сырьевого источника рудников особого месторождения – кобальтоносного песчаника и сланца.

Следующие монеты с точными датировками – анонимные монеты Барджин 1352 г. и Сарай ал-Джадида и 1371 г. – вновь были отлиты из меди с малым количеством золота, однако в ней присутствует более 0.1% олова. В настоящее время таких типов месторождений не осталось, по крайней мере используемых в промышленных масштабах, поэтому определить породу, явившуюся источником этой меди, достаточно сложно. Исследователи металлургии бронзового века склоняются к мнению, что в древние времена были многочисленные выходы рудных образований, имевших в своем составе медно-оловянную компоненту [31], что и привело к феномену бронзового века. О существовании Центрально-кызылкумского горнорудного центра медно-оловянного сырья в эпоху бронзы сообщают узбекские археологи [32]. И в нашем случае можно однозначно говорить о привлечении явно иного, нежели в более ранние времена, источника меди для выплавки монетного металла.

В анонимных монетах, датированных 1290–1320 гг., и монете Сарай ал-Джадида «розетка» 1350 г. определяется медь с наличием значимых примесей золота более 0,01% сначала без существенных показателей олова, а уже в анонимной монете Мохши «розетка» 1357 г. группы 5 отмечается намного более высокая концентрация этого элемента. Золото в таких количествах присутствует в монетах вплоть до 1395 г. (анонимная Сарай ал-Джадида).

Эти факты не исключают следующей интерпретации денежного производства Золотой Орды: в конце XII в. на чеканные дворы поступает металл с месторождений медно-порфирного характера, а с 1340-х гг. – с рудников оловосодержащей медной руды, поэтому начиная со второй половины XIV в. в монетах обе эти примеси присутствуют в значимых количествах.

Поздние монеты 1380–1390 гг. группы 8 демонстрируют яркий пример образца исходной руды медно-никелевого сульфидного характера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показали проведенные исследования, наблюдается картина использования совершенно определенных источников медного сырья в различные периоды времени существования государства Золотая Орда. Объективные данные анализа химического состава доказывают факт централизованной поставки металла для чеканки денег, которая контролировалась государством [33], что противоречит высказываниям некоторых нумизматов о чеканке монет из металлического лома. Возможно, территориально часть из средневековых рудников располагалась в определенном районе, а разнообразие примесного состава объясняется разработкой различных участков месторождения. Однако не все руды можно объединить по своему характеру, и, вероятнее всего, имело место широкое географическое разнообразие сырьевых источников.

Микроэлементная характеристика монет может служить важным информационным источником не только о типах сырьевых источников исходного металла, но и о времени чеканки и хождения денежных артефактов. Выявленная нами корреляция между примесным составом и хронологией/местом чеканки ставит конкретную задачу автоматической классификации, для решения которой могут быть привлечены методы машинного обучения. Накопленные аналитические данные в сочетании с изображениями монет послужили основой для подготовки опубликованного открытого датасета [14].

Перспективы применения средств искусственного интеллекта и информационных технологий

Несмотря на ограниченные возможности проведенных исследований в составлении аналитической выборки монет, была проведена обработка большого объема данных по химическому составу, которая позволила сделать ряд предположений о денежной политике государства Улус Джучи. Исследования показали соответствие распределения монет по химическому составу определенным временным интервалам. Данный факт свидетельствует о том, что чеканные дворы в конкретный временной период использовали медь из конкретного источника, что, в свою очередь, может свидетельствовать о централизованной выплавке монетной меди, поступавшей затем в различные регионы Золотой Орды. Такой

вывод основан на объективных аналитических данных достаточно представительной коллекции, однако видится необходимым проведение дополнительных исследований медного денежного материала всех золотоордынских регионов. Дальнейшего развития требует также более детальное сопоставление полученных результатов химического анализа и типа монет. Представляется также целесообразным рассмотреть возможности применения в исследованиях современных средств искусственного интеллекта и информационных технологий.

В мировой практике накоплен значительный опыт использования методов машинного обучения для решения нумизматических задач. Архитектуры глубоких нейронных сетей, такие как CoinNet [6], успешно применяются для автоматической классификации монет по изображениям, достигая точности выше 98% на крупных датасетах. Вместе с тем необходимо отметить, что прямой перенос подходов, разработанных для классификации монет с изобразительными мотивами, на джучидский материал потребует адаптации, поскольку золотоордынские медные монеты являются преимущественно эпиграфическими и основным классификационным элементом выступает арабская каллиграфия (куфи, насх), часто имеющаяся на плохо сохранившихся поверхностях. Методы объектного обнаружения (object detection) используются для автоматической инвентаризации археологических артефактов, существенно ускоряя обработку массовых находок [8]. Методы компьютерного зрения также находят применение в задачах штемпельного анализа и распознавания надписей на монетах [7]. Особое значение для эпиграфических исследований имеет нейронная сеть Ithaca, представленная в журнале Nature: она продемонстрировала возможность восстановления и атрибуции древнегреческих надписей, повысив точность исторических оценок с 25% до 72% [9]. Комбинирование данных химического анализа (EDXRF, ЭСА) с алгоритмами классификации (Random Forest, XGBoost, сверточные нейронные сети) также позволяет выполнять провениенс-анализ археологических материалов с точностью свыше 95%, недостижимой при использовании традиционных статистических методов [12, 13]. Кроме того, в области геологоразведки сверточные нейронные сети с механизмами самовнимания используются для построения карт перспективности рудных месторождений (mineral prospectivity mapping) [10, 11], что открывает перспективы использования аналогичных подходов для

поиска средневековых рудников на основании косвенных данных, получаемых при анализе монет.

Особый интерес представляет возможность интеграции визуальных данных (фотографий аверса и реверса) и аналитических данных (химического состава) в единую систему, способную автоматически классифицировать монеты по типам, хронологии и возможным рудным источникам. Подобная мультимодальная платформа, аналогичная недавно предложенной системе Nummi Digitali [33], могла бы существенно повысить эффективность нумизматических исследований золотоордынского периода.

Данные, имеющиеся в настоящей работе, позволяют конкретизировать эти перспективы. Выделенные 10 элементных групп с диагностическими соотношениями Au/Ag, Ni/Co, As/Sb по сути представляют собой готовые метки классов для задачи контролируемой классификации, а данные эмиссионного спектрального анализа по 12 элементам для 98 образцов формируют матрицу признаков, пригодную для обучения моделей. На выборках такого объема наиболее эффективными являются ансамблевые методы (Random Forest, Gradient Boosting), позволяющие не только проводить классификацию, но и оценивать значимость отдельных элементов-примесей для разделения групп. Для задач визуальной классификации монет, требующих, как правило, тысяч обучающих примеров, перспективным решением является перенос обучения (transfer learning) – дообучение предобученных нейронных сетей на относительно небольшой целевой выборке.

К созданию археологического датасета джучидских монет

Применительно к нумизматическому материалу Золотой Орды одной из наиболее перспективных задач является создание специализированного датасета, объединяющего изображения монет, их нумизматическую атрибуцию и данные о химическом составе. В настоящее время аналогичные датасеты существуют для античных монет: датасет RRCD содержит более 18000 изображений римских республиканских монет по 228 классам реверсных мотивов [6], база данных OCRE (Online Coins of the Roman Empire) включает свыше 43000 типов монет со ссылками на более чем 100000 физических экземпляров [34], а платформа

Nomisma.org обеспечивает семантическую интероперабельность нумизматических данных посредством связанных открытых данных (Linked Open Data) [35]. В области исламской нумизматики крупнейшим фотографическим ресурсом является база Zeno.ru, содержащая более 300000 изображений восточных монет, включая обширную секцию Золотой Орды [36]. Однако этот ресурс представляет собой сообщество коллекционеров и не является институционально курируемой базой с машиночитаемыми метаданными и археометрическими данными.

Опубликованная нами библиотека данных [14], объединяющая фотографии 98 медных монет с результатами нумизматической атрибуции и количественными данными химического анализа двумя независимыми методами, представляет собой первую версию специализированного датасета. Для его эффективного использования в задачах машинного обучения необходимы расширение коллекции за счет материалов других золотоордынских городищ (Селитренное, Царевское, Маджар и др.), стандартизация метаданных в соответствии с принципами FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) и интеграция с существующими изотопными базами данных, прежде всего с GlobalID [3]. Формирование такого датасета позволило бы автоматизировать первичную атрибуцию массового нумизматического материала из раскопок, выполнять провениенс-анализ на основе машинного обучения и проводить крупномасштабные сравнительные исследования денежного обращения Золотой Орды.

К перечисленным шагам можно добавить два собственно ML-ориентированных этапа: построение базовой модели классификации монет по химическому составу с использованием ансамблевых методов и пилотную разметку изображений для задачи визуальной классификации типов монет. Их реализация позволит верифицировать предложенные химические группировки методами машинного обучения и оценить их устойчивость при включении новых данных.

Другой интересной задачей, требующей дополнительных исследований, является археометрическое изучение богатейшей нумизматической коллекции раскопа 199, имеющего все признаки нахождения на его территории монетного двора.

Нам представляется, что опубликованный открытый датасет [14] и обозначенные направления могут стать отправной точкой для дальнейших междисциплинарных исследований джучидской нумизматики с применением методов машинного обучения и искусственного интеллекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pernicka E. Provenance Determination of Archaeological Metal Objects // *Archaeometallurgy in Global Perspective*, Springer. 2014. P. 239–268.
https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9017-3_11
2. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М., 1969. 668 с.
3. Klein S., Rose T., Westner K.J., Hsu Y.-K. From OXALID to GlobaLID: Introducing a modern and FAIR lead isotope database with an interactive application // *Archaeometry*. 2022. Vol. 64, No. 4. P. 935–950.
<https://doi.org/10.1111/arcm.12762>
4. Lahaye Y. The early Roman Imperial AES coinage II: Tracing the copper sources by analysis of lead and copper isotopes – copper coins of Augustus and Tiberius // *Archaeometry*. 2004. Vol. 46, No. 3. P. 469–480.
5. Merkel S.W., Oravisjärvi J., Kershawet J. Sources of early Islamic silver: lead isotope analysis of dirhams // *Antiquity*. 2023. Vol. 97 (396). P. 1564-1580.
<https://doi.org/10.15184/aqy.2023.165>
6. Anwar H., Saeed Anwar S., Zambaninie S., Porikliet F. CoinNet: Deep Ancient Roman Republican Coin Classification via Feature Fusion and Attention // *Pattern Recognition*. 2021. Vol. 114. 107871.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.09428>
7. Bickler S.H. Machine Learning Arrives in Archaeology // Cambridge University Press. *Advances in Archaeological Practice*. 2021. Vol. 9, No. 2.
<https://doi.org/10.1017/aap.2021.6>
8. Mnasri Z., D'Andrea A. Automatic inventory of archaeological artifacts based on object detection and classification using deep and transfer learning // *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2025. Vol. 39. e00458.
<https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00458>
9. Assael Y., Sommerschild T., Shillingford B., Bordbar M., Pavlopoulos J.,

Chatzipanagiotou M., Androutsopoulos I., Prag J., De Freitas N. Restoring and attributing ancient texts using deep neural networks // *Nature*. 2022. Vol. 603. P. 280–283. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04448-z>

10. *He H., Zhu H., Yang X., Zhang W., Wang J.* Mineral prospectivity prediction based on CNN and ensemble learning // *Nature. Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, No. 1. 22654. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73357-0>

11. *Dong Y., Zhang Zh.* Deep Forest Modeling: An Interpretable Deep Learning Method for Mineral Prospectivity Mapping // *JGR: Machine Learning and Computation*. 2024. Vol. 1, No. 4. <https://doi.org/10.1029/2024JH000311>

12. *Dos Reis M.L. 1, Dos Santos S., Júnior E., de S Dias F., Teixeira L.* Analysis of elemental composition using energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry and artificial intelligence for categorizing archaeological coins // *Talanta*. 2026. Vol. 298 (Pt A). 128846. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128846>

13. *Deep learning assisted XRF spectra classification* // *Scientific Reports*. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53988-z>

14. *Храмченкова Р.Х., Мухаметшин Д.Г., Елизаров А.А., Федан П.В.* Библиотека данных по нумизматической атрибуции и химическому составу медных монет золотоордынского времени с Болгарского городища [Электронный ресурс]. Zenodo. 2026. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19947774>

15. *Клоков В.Б., Лебедев В.П.* Монетный комплекс с Селитренного городища. (Золотая Орда, город Сарай) // *Древности Поволжья и других регионов. Сборник статей. Вып. 4. Нумизматический сборник. Том 3.* Москва: ИПР «Информэлектро», 2002. С. 73–165.

16. *Клоков В.Б., Лебедев В.П.* Монетное обращение золотоордынского города Бельджамен // *Древности Поволжья и других регионов. Сборник статей. Вып. 111. Нумизматический сборник. Том 2.* Москва: ИПР «Информэлектро», 2000. С. 56–63.

17. *Лебедев В.П., Беговатов Е.А., Храмченкова Р.Х.* Монетовидные литые подвески Волжской Болгарии // *Нумизматика Золотой Орды*. 2012. № 2. С. 163–174.

18. *Храмченкова Р.Х., Беговатов Е.А., Шайхутдинова Е.Ф., Ситди-*

ков А.Г. Предварительные результаты археометрических исследований серебряных монет 10 века Волжской Болгарии // Поволжская Археология. 2015. № 3 (13). С. 176–188.

19. *Sitdikov A., Khramchenkova R., Shaykhutdinova E.* Technological characteristics in manufacturing of cast coins // *European Research Studies Journal*. 2017. Vol. 20. № S. P. 170–176.

20. *Khramchenkova R., Shaykhutdinova E., Sitdikov A.* Characteristics of the manufacturing technology of the 9th–10th century medieval silver coins discovered in the territory of Volga Bulgaria // 3rd International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts SGEM 2016, Book 3. Vol. 2. P. 263–272.

21. *Khramchenkova R., Shaykhutdinova E., Bugarchev A., Gareev B., Sitdikov A.* Interdisciplinary study of 13th century silver coins of the Juchid (based on the materials of the Burundukovsky hoard, Tatarstan, Russia) // *Acta IMEKO*. 2017. Vol. 6. No. 3. P. 94–101.

22. *Шерешев Л.И.* О технике изготовления в средневековом Херсонесе монет типа «ро» // *Античная древность и средние века*. Свердловск, 1982. [Вып. 19]: Византия и ее провинции. С. 38–47.

23. *Карамбахшов Х.З., Бобомуллоев М.Г., Сафарова З.А., Мубориз М.Х., Самихов Ш.Р., Сафаров С.Ш.* Анализ и восстановление серии медных монет, найденных при археологических раскопках (Мис-Айнак, Афганистан) // *Доклады Академии наук Республики Таджикистан. Физическая химия*. 2017. Т. 60, № 9. С. 447–451.

24. *Calliari I., Magrini M., Zambon A., Guerriero P. and Martini R.* Microstructural and compositional characterization of roman coins // *X-Ray Spectrometry*. 1999. Vol. 28. P. 86–90.

25. *Ingo G.M., De Caro T., Padeljerri G. and Chiozzini G.* Microchemical investigation on Renaissance coins minted at Gubbio (central Italy) // *Applied Physics A*. 2004. Vol. 79. P. 319–325.

26. *Chiarantini L., Benvenuti M.* The evolution of pre-Islamic South Arabian coinage: a metallurgical analysis of coins excavated in Sumhuram (Khor-Rori, Sultanate of Oman) // *Archaeometry*. 2014. Vol. 56, No. 4. P. 625–650.

27. *Allouch Ali, Lamrhari M., Benyaich F.* Physico-hemical, archaeological and

numismatic analysis of Almoravid gold coins (XIth to XIIth century) // *Journal of Human University (Natural Science)*. 2022. Vol. 49, No. 12. P. 227–234.

<http://jonuns.com/index.php/journal/index>

28. *Kirfel A., Kockelman W., Yule P.* Non-destructive chemical analysis of old South Arabian coins, century to third century CE // *Archaeometry*. 2011. Vol. 53. P. 930–949.

29. *Мухамадиев А.Г.* Булгаро-татарская монетная система XII–XIV вв. М.: 1983, 168 с.

30. *Берденов С.А.* Казахстанские месторождения меди и олова и их разработка в бронзовом веке // *Известия НАН РК. Серия общественных наук. Перво-бытная и древняя археология*. 2008. № 1. С. 42–55.

31. *Медведев В.Е., Малахов В.В., Власов А.А., Болдырева Н.Н., Кундо Л.П., Овсянникова И.А., Ревуцкая Г.К.* О химическом составе металлических изделий из памятников чжурчжэньской культуры Приамурья // *Гуманитарные науки в Сибири*. 1997. № 3. С. 19–26.

32. *Рузанов В.Д.* Рудная база металлургии степных племен Фергано-Ташкентского региона в эпоху бронзы // *Том 1: Маргулановские чтения. Археология древности*. 2023. С. 120–129.

<https://doi.org/10.52967/3007-6528.2023.1.120.129>

33. *Sole L., Dario Giuffrida D., Portale E.C., Armetta F., Perri M., Adinolfi O., Saladino M.L., Ponterio R.C.* Nummi Digitali: A pioneering multimodal platform for numismatic heritage // *PLOS One*. 2025. Vol. 20, No. 10. e0332151.

34. OCRE – Online Coins of the Roman Empire.

<https://numismatics.org/ocre/>

35. *Gruber E., Meadows A.* Numismatics and Linked Open Data // *ISAW*. 2021. ISAW Papers 20. 6. <http://hdl.handle.net/2333.1/q83bkdqf>.

36. Zeno.ru – Oriental Coins Database. <https://www.zeno.ru/>

ARCHAEOLOGICAL ANALYSIS OF COPPER COINS FROM THE GOLDEN HORDE PERIOD FROM A BULGARIAN SETTLEMENT AS AN INSTRUMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

R. Kh. Khrumchenkova¹ [0000-0001-9598-2024], D. G. Mukhametshin² [0009-0003-9879-1866],
A. A. Elizarov³ [0000-0001-6324-4609], A. G. Sitdikov⁴ [0000-0001-6314-3568],
P. V. Fedan⁵ [0000-0002-1457-4203]

^{1, 2, 4}*Institute of Archaeology named after A. Kh. Khalikov of Tatarstan Academy of Science, Kazan, Russia*

^{3, 5}*Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia*

¹rkhrumch@gmail.com, ²djamil78@list.ru, ³artelizar@gmail.com,

⁴sitdikov_a@mail.ru, ⁵pavel.fedan@mail.ru

Abstract

The work is a pioneer in studying of the chemical composition at the micro-impurity level of archaeological copper coins as an information basis for identifying the features of monetary circulation in the medieval state.

An interdisciplinary study of the numismatic material from the Bulgarian settlement of 98 copper coins, represented by 91 Golden Horde, 6 foreign coins of the same period and one coin of the pre-Mongol period of the Zengid dynasty, was conducted. The article contains attribution with images of the obverse and reverse of coins and data of archaeometric chemical composition study of monetary artifacts using two independent methods – X-ray fluorescence and emission spectral.

This is the first interdisciplinary study in our country at present time, covering a representative collection of copper coins of various rulers and mints from archaeological materials of the Bulgarian settlement. As a result of studying the chemical composition of the coins, the ratios of impurities in copper alloys were determined, which divide the collection into ten main groups, including coins of various minted courts and rulers of a certain date. The determination of the impurity composition allows not only to classify coins into groups, but also to put forward reasonable hypotheses about the geographical location of copper deposits used for minting.

The database, compiled from the research results and combining numismatic

attribution, coin images, and chemical composition data, is published as an open dataset in the Zenodo repository and is intended for the application of machine learning and artificial intelligence methods in the tasks of automatic identification and provenance analysis of medieval coins.

Keywords: *copper coins of the Jochid dynasty, chemical composition, numismatic data, Bolgar settlement, emission spectral analysis, X-ray fluorescence analysis, provenance analysis, archaeological datasets, machine learning, digital numismatics.*

REFERENCES

1. Pernicka E. Provenance Determination of Archaeological Metal Objects // *Archaeometallurgy in Global Perspective*, Springer. 2014. P. 239–268. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-9017-3_11
2. Smirnov V.I. *Geology of Mineral Deposits*. Moscow, 1969. 668 p.
3. Klein S., Rose T., Westner K.J., Hsu Y.-K. From OXALID to GlobaLID: Introducing a modern and FAIR lead isotope database with an interactive application // *Archaeometry*. 2022. Vol. 64, No. 4. P. 935–950. <https://doi.org/10.1111/arcm.12762>
4. Lahaye Y. The early Roman Imperial AES coinage II: Tracing the copper sources by analysis of lead and copper isotopes – copper coins of Augustus and Tiberius // *Archaeometry*. 2004. Vol. 46, No. 3. P. 469–480.
5. Merkel S.W., Oravisjärvi J., Kershawet J. Sources of early Islamic silver: lead isotope analysis of dirhams // *Antiquity*. 2023. Vol. 97 (396). P. 1564–1580. <https://doi.org/10.15184/aqy.2023.165>
6. Anwar H., Saeed Anwar S., Zambaninie S., Porikiet F. CoinNet: Deep Ancient Roman Republican Coin Classification via Feature Fusion and Attention // *Pattern Recognition*. 2021. Vol. 114. 107871. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.09428>
7. Bickler S.H. *Machine Learning Arrives in Archaeology* // Cambridge University Press. *Advances in Archaeological Practice*. 2021. Vol. 9, No. 2. <https://doi.org/10.1017/aap.2021.6>
8. Mnasri Z., D'Andrea A. Automatic inventory of archaeological artifacts based on object detection and classification using deep and transfer learning // *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*. 2025. Vol. 39. e00458. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2025.e00458>

9. Assael Y., Sommerschield T., Shillingford B., Bordbar M., Pavlopoulos J., Chatzipanagiotou M., Androutsopoulos I., Prag J., De Freitas N. Restoring and attributing ancient texts using deep neural networks // *Nature*. 2022. Vol. 603. P. 280–283. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04448-z>
10. He H., Zhu H., Yang X., Zhang W., Wang J. Mineral prospectivity prediction based on CNN and ensemble learning // *Nature. Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, No. 1. 22654. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73357-0>
11. Dong Y., Zhang Zh. Deep Forest Modeling: An Interpretable Deep Learning Method for Mineral Prospectivity Mapping // *JGR: Machine Learning and Computation*. 2024. Vol. 1, No. 4. <https://doi.org/10.1029/2024JH000311>
12. Dos Reis M.L. 1, Dos Santos S., Júnior E., de S Dias F., Teixeira L. Analysis of elemental composition using energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry and artificial intelligence for categorizing archaeological coins // *Talanta*. 2026. Vol. 298 (Pt A). 128846. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128846>
13. *Deep learning assisted XRF spectra classification* // *Scientific Reports*. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53988-z>
14. Khramchenkova R.Kh., Mukhametshin D.G., Elizarov A.A., Fedan P.V. Data Library on Numismatic Attribution and Chemical Composition of Copper Coins of the Golden Horde Period from the Bulgarian Settlement [Data set]. Zenodo. 2026. <https://doi.org/10.5281/zenodo.19947774>
15. Klovov V.B., Lebedev V.P. Antiquities of the Volga region and other regions. Moscow: Digest of articles, Issue 4, Numismatic collection. Volume 3. IPR "Informelectro". 2002. P. 73–165.
16. Klovov V.B., Lebedev V.P. Antiquities of the Volga region and other regions // Moscow: Digest of articles, Issue 111, Numismatic collection. IPR "Informelectro". 2000. Vol. 2. P. 56–63.
17. Lebedev V.P., Begovatov E.A., Hramchenkova R.H. Coin-shaped cast pendants of Volga Bulgaria// *Numismatics of the Golden Horde*. 2012. No. 2. P. 163–174.
18. Khramchenkova R.KH., Begovatov Ye.A., Shaykhutdinova Ye.F., Sitdikov A.G. Preliminary results of archaeometric studies of 10th century silver coins of Volga Bulgaria// *Series: Povolzhskaya arheologiya (Volga archeology)*. 2015. No. 13. P. 176–188.

19. *Sitdikov A., Khramchenkova R., Shaykhutdinova E.* Technological characteristics in manufacturing of cast coins // *European Research Studies Journal*. 2017. Vol. 20. No. S. P. 170–176.
20. *Khramchenkova R., Shaykhutdinova E., Sitdikov A.* Characteristics of the manufacturing technology of the 9th-10th century medieval silver coins discovered in the territory of Volga Bulgaria // 3rd International Multidisciplinary Scientific Conference on Social Sciences and Arts SGEM 2016, www.sgemsocial.org, SGEM2016 Conference Proceedings, Aug 24–31, 2016, Book 3. Vol. 2. P. 263–272.
21. *Khramchenkova R., Shaykhutdinova E., Bugarchev A., Gareev B., Sitdikov A.* Interdisciplinary study of 13th century silver coins of the Juchid (based on the materials of the Burundukovsky hoard, Tatarstan, Russia) // *Acta Imeko*. 2017. Vol. 6, No. 3. P. 94–101. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v6i3.463
22. *Shereshev L.I.* Antiquity and the Middle Ages // *Sverdlovsk: Byzantium and its provinces*. 1982. Issue 19. P. 38–47.
23. *Karambahshov H.Z., Bobomulloev M.G., Safarova Z.A., Muboriz M.H., Samihov SH.R., Safarov S.SH.* Analysis and restoration of a series of copper coins found during archaeological excavations (Mis Aynak, Afghanistan). // *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Physical chemistry*. 2017. Vol. 60, No. 9. P. 447–451.
24. *Calliari I., Magrini M., Zambon A., Guerriero P., Martini R.* Microstructural and compositional characterization of roman coins // *X-Ray Spectrometry*. 1999. Vol. 28. P. 86–90.
25. *Ingo G.M., De Caro T., Padeljerri G., Chiozzini G.* Microchemical investigation on Renaissance coins minted at Gubbio (central Italy) // *Applied Physics A*. 2004. Vol. 79. P. 319–325.
26. *Chiarantini L., Benvenuti M.* The evolution of pre-Islamic South Arabian coinage: a metallurgical analysis of coins excavated in Sumhram (Khor-Rori, Sultanate of Oman) // *Archaeometry*. 2014. Vol. 56, No. 4. P. 625–650.
27. *Ali Allouch, Lamrhari M., Benyaich F.* Physico-chemical, archaeological and numismatic analysis of Almoravid gold coins (XIth to XIIth century) // *Journal of Human University (Natural Science)*. 2022. Vol. 49, No. 12. P. 227–234. <http://jonuns.com/index.php/journal/index>

28. Kirfel A., Kockelman W., Yule P. Non-destructive chemical analysis of old South Arabian coins, century to third century CE // *Archaeometry*. 2011. Vol. 53. P. 930–949.
29. Muhamadiev A.G. Bulgaro-Tatar monetary system of the XII-XIV centuries. Moscow, 1983, 168 p.
30. Berdenov S.A. Kazakhstan copper and tin deposits and their development in the Bronze Age // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of social sciences. Primitive and ancient archeology*. 2008. No. 1. P. 42–55.
31. Medvedev V.E., Malahov V.V., Vlasov A.A., Boldyreva N.N., Kundo L.P., Ovsyannikova I.A., Revuckaya G.K. On the chemical composition of metal products from the monuments of the Jurchen culture of the Amur region // *Humanities in Siberia*. 1997. No. 3. P. 19–26.
32. Savchuk-Kurbanov S. Ruzanov V.D. Ore base of metallurgy of the steppe tribes of the Fergana-Tashkent region in the Bronze Age // *Volume 1: Margulan Readings. Archaeology of Antiquity*. 2023. P. 120–129. <https://doi.org/10.52967/3007-6528.2023.1.120.129>
33. Sole L., Dario Giuffrida D., Portale E.C., Armetta F., Perri M., Adinolfi O., Saladino M.L., Ponterio R.C. Nummi Digitali: A pioneering multimodal platform for numismatic heritage // *PLOS One*. 2025. Vol. 20, No. 10. e0332151.
34. OCRE – Online Coins of the Roman Empire. <https://numismatics.org/ocre/>
35. Gruber E., Meadows A. Numismatics and Linked Open Data // *ISAW*. 2021. ISAW Papers 20. 6. <http://hdl.handle.net/2333.1/q83bkdqf>.
36. Zeno.ru – Oriental Coins Database. <https://www.zeno.ru/>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ХРАМЧЕНКОВА Резида Хавиловна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института археологии им А. Х. Халикова АН Республики Татарстан. Область научных интересов – археометрия, исследование археологических находок естественно-научными методами. Число научных публикаций – 121.

Rezida Khavilovna KHRAMCHENKOVA, PhD, senior researcher at the A. Kh. Khalikov Institute of Archaeology of the Tatarstan Academy of Sciences. Research interests include archaeometry and the study of archaeological finds using natural science methods. Number of publications 121.

email: xinyuema35@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9598-2024



МУХАМЕТШИН Джамиль Габдрахимович – кандидат исторических наук, старший научный сотрудник института археологии им А. Х. Халикова АН Республики Татарстан. Область научных интересов – средневековая история, нумизматика. Число научных публикаций – 5 монографий, более 250 статей.

Jamil Gabdrakhimovich MUKHAMETSHIN – PhD, senior researcher at the A. Kh. Khalikov Institute of Archaeology of the Tatarstan Academy of Sciences. Area of scientific interests: medieval history, numismatics. Number of scientific publications – 5 monographs, more than 250 articles.

email: djamil78@list.ru

ORCID: 0009-0003-9879-1866



ЕЛИЗАРОВ Артем Александрович — аспирант Института информационных технологий и интеллектуальных систем Казанского (Приволжского) федерального университета. Область научных интересов — применение методов машинного обучения и искусственного интеллекта в междисциплинарных исследованиях, интеллектуальный анализ данных. Число научных публикаций — 3.

Artem Aleksandrovich ELIZAROV — PhD student at the Institute of Information Technologies and Intelligent Systems, Kazan (Volga Region) Federal University. Research interests include machine learning and artificial intelligence applications in interdisciplinary research, data analysis. Number of scientific publications — 3.

email: artelizar@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6324-4609



СИТДИКОВ Айрат Габитович — доктор исторических наук, руководитель (директор) обособленного структурного подразделения Института археологии им. А. Х. Халикова АН Республики Татарстан. Область научных интересов — история, археология. Число научных публикаций — более 230.

Ayrat Gabitovich SITDIKOV — Doctor of Historical Sciences, director of the Institute of Archaeology named after A. Kh. Khalikov of the Tatarstan Academy of Sciences. Research interests: history, archaeology. Number of scientific publications — more than 230.

email: sitdikov_a@mail.ru

ORCID: 0000-0001-6314-3568



ФЕДАН Павел Владимирович – научный сотрудник Музея археологии Института археологии им А. Х. Халикова АН Республики Татарстан; доцент кафедры конструктивно-дизайнерского проектирования Института дизайна и пространственных искусств Казанского (Приволжского) федерального университета. Область интересов – история, реставрация археологических находок. Число научных публикаций – 16.

Pavel Vladimirovich FEDAN – researcher at the Museum of Archeology, Institute of Archaeology named after A. Kh. Khalikov of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan; associate professor of the Department of Structural Design, Institute of Design and Spatial Arts, Kazan (Volga Region) Federal University. Research interests: history, restoration of archaeological finds. Number of scientific publications – 16.

email: pavel.fedan@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1457-4203

Материал поступил в редакцию 29 января 2026 года