

УДК 543.427.4:902/904

<https://doi.org/10.24852/2587-6112.2024.5.337.349>

РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ДРЕВНИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕДМЕТОВ ИЗ УЗБЕКИСТАНА

©2024 г. И.А. Шаронов, А.С. Алибеков, А.Х. Атаходжаев,
М.А. Реутова, А.М. Музафаров

Представлены результаты элементного анализа некоторых древних металлических артефактов (наконечники стрел, монеты, разные изделия), найденных при проведении археологических раскопок на территории Узбекистана. В образцах выявлено до 30 химических элементов - Ag, Al, As, Au, Ba, Ca, Cl, Co, Cs, Cu, Fe, I, K, Mn, Mo, Ni, Os, P, Pb, S, Sb, Sc, Si, Sn, Tb, Th, Ti, V, Zn, Zr. Определено, что обследованные артефакты сделаны из различных медных сплавов с содержанием меди от ~ 46% до ~ 94% с заметными примесями свинца (до ~29%), олова (до ~7%), цинка (до ~13%). В одной из медных монет обнаружена заметная примесь серебра ~ 6%. Предполагается, что при изготовлении исследованных предметов кроме основного металла мог использоваться также металлический лом из различных отходов металлургического производства, сломанных и забракованных металлических изделий. Определен элементный состав серебряной монеты династии Кунгратов (96% серебра). Элементный анализ выполнен методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа.

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентный анализ, археологические артефакты, пробоподготовка, медные сплавы, монеты, наконечники стрел, металлические изделия, Узбекистан

X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS OF ANCIENT METAL OBJECTS FROM UZBEKISTAN

I.A. Sharonov, A.S. Alibekov, A.H. Atakhodjaev, M.A. Reutova, A.M. Muzafarov

This paper presents the results of elemental analysis of some ancient metal artifacts (arrowheads, coins, various items), found during archeological excavations in Uzbekistan. Up to 30 chemical elements (Ag, Al, As, Au, Ba, Ca, Cl, Co, Cs, Cu, Fe, I, K, Mn, Mo, Ni, Os, P, Pb, S, Sb, Sc, Si, Sn, Tb, Th, Ti, V, Zn, Zr) were detected in the samples. It is assumed that the studied artifacts are made of various copper alloys with copper concentration from ~ 46% to ~ 94% with noticeable admixtures of lead (up to ~ 29%), tin (up to ~ 7%), zinc (up to ~ 13%). In one of the copper coins a noticeable impurity of silver ~ 6% was found. It is assumed that during the manufacture of the studied items besides the base metal could be used also scrap metal from various wastes of metallurgical production, broken and rejected metal products. The composition of the silver coin of the Kungrat dynasty (96% silver) was determined. Elemental analysis was made by energy dispersive X-ray fluorescence analysis.

Keywords: X-ray fluorescence analysis, archaeological artifacts, sample preparation, copper alloys, coins, arrowheads, metal items, Uzbekistan.

На территории Узбекистана археологи находят множество различных артефактов (фрагменты древних настенных живописей, керамики, металлические изделия и др.). Изучение артефактов позволяет археологам делать выводы о возможном происхождении находок, возможных путях их распространения, об уровне используемых древних технологий, о торговых и культурных связях древних народов. Археологами при изучении древних находок давно применяются различные инструментальные методы анализа, которые позволяют определить состав находок. Это нашло отражение во многих научных

публикаций, связанных с изучением археологических артефактов, например, (Mantler, Schreiner, 2000; Рузанов Анарбаев, Реутова, 2006; Рузанова, Рощина, 2010; Bottaini et al., 2012; Шубин, 2015; Tur et al., 2016; Рузанова, 2016; Храмченкова и др., 2017; Шайхутдинова и др., 2017; Daly, Fenelon, 2018; Епимахов, 2019; Сабирова, 2019; Мокрушин и др., 2020; Рузанов, 2013, 2021; Бейсенов, Тишкин, 2022; Young et al., 2023; Таиров, Блинов, 2024).

Учитывая желательность применения неразрушающих методов анализа при исследовании археологических артефактов нами использовался метод рентгенофлуоресцент-

ного анализа (РФА). Он позволяет проводить анализ веществ с высокой точностью и без разрушения исследуемых объектов. РФА основан на том, что при облучении вещества рентгеновским излучением возникает характеристическое излучение, создаваемое возбужденными атомами вещества. Спектр этого излучения индивидуален для каждого химического элемента, что позволяет определять элементный (атомарный) состав вещества.

Нами использовался энергодисперсионный спектрометр *EDX-7000 SHIMADZU* (диапазон определяемых элементов ^{11}Na – ^{92}U , определяемые концентрации от *ppm* до 100%). При анализе объектов с неизвестным многоэлементным составом обычно применяют метод фундаментальных параметров, не требующий наличия образцов сравнения и основанный на вычислении содержания элементов путем использования фундаментальных физических параметров (спектральное распределение, вероятность флуоресценции, массовые коэффициенты поглощения рентгеновского излучения), а также характеристик спектрометра и геометрии измерений. В этой статье мы приводим результаты РФА 14 металлических артефактов, найденных в разное время при проведении археологических раскопок на территории Узбекистана:

3 трехлопастных наконечника стрел (АН-1, АН-2 и АН-3). Это типичные образцы стрелкового набора кочевого скотоводческого населения степной зоны Евразии от Северного Причерноморья до Алтая, начиная с I тысячелетия до IV-III вв н.э.

Подвеска (РА). Предполагается, что это часть женского украшения, например, ожерелья. Предположительно датируется X–XII вв н.э.

Маленькая чашечка с ручками и носиком (Bowl-1). Идентифицирована как косметический предмет, используемый для подкрашивания бровей - сурмадон. Предположительно датируется XI вв н.э.

Небольшой стаканчик колоколообразной формы (Bowl-2). Идентифицирован как основа для мерной гири, заполняемая свинцом для получения необходимого веса гири. Предположительно датируется X-XI вв н.э.

Фрагмент ложечки (Sp). Предположительно датируется VII-VIII вв. н.э.

2 монеты династии Кунгратов. Дирхем серебрянный AG и монета CO-1 – Хорезм, конец XIX – начало XX вв. н.э.

Монета CR-2 династии Саманидов. Фергана, 819-1005 гг. н.э.

2 монеты CR-6 и CR-7 династии Чагатаидов. Центральный Мавераннахр, 3-я четверть XI в. н.э.

2 монеты династии Караханидов. CR-1 - Центральный Мавераннахр, 1102-1130 гг н.э. и CR-8 - Узденд, 1174-1175 г. н.э.

Фотографии этих артефактов показаны на рисунке 1.

Поверхность наконечников стрел АН-1, АН-2, АН-3, сурмадона Bowl-1, стаканчика Bowl-2, монеты CR-7 была оксидирована. Подвеска РА, фрагмент ложечки Sp, монеты CO-1, CR-1, CR-2, CR-6, CR-8 были покрыты зацементированной землей, под которой обнаружены участки, покрытые твердыми черными наслоениями, очевидно, купритом (трудно растворимая закись меди). Поэтому перед началом испытаний образцы подвергались необходимой механической и химической очистке.

При механической очистке с поверхности предметов снимались наслоения закаменевшей земли и окислов. Операция проводилась осторожно, чтобы не повредить элементы оформления артефактов (изображения, надписи, художественная гравировка и т.п.), которые возможно находятся под счищаемыми наслоениями.

Для химической очистки артефактов использован препарат Трилон-Б, успешно применяемый в реставрационной практике для очистки металлических изделий (Шемаханская, 1989; Никитин, Мельникова, 1990). Его действие основано на замещении ионов металла из нерастворимых в воде солей ионами натрия, почти все соли которого растворимы в воде. С помощью Трилон-Б можно растворить практически все нерастворимые в воде продукты коррозии - оксиды, фосфаты, сульфаты и, что важно, куприт, который обладает высокой твердостью и удаляется с большим трудом.

При растворении Трилон-Б в горячей воде повышается его эффективность. Наиболее эффективно продукты коррозии удаляются в горячем 10% растворе (при предельном насыщении раствора), поэтому обработка анализируемых образцов проводилась в нагреваемом термостойком стеклянном сосуде. Для более равномерного протекания и ускорения химической реакции раствор периодически пере-



Рис. 1. Фотографии обследованных археологических артефактов
Fig. 1. Photos of the surveyed archaeological artifacts

мешивался стеклянной палочкой. Очищаемые предметы периодически вынимались из раствора, промывались проточной водой, очищались щеткой от продуктов реакции и, при необходимости, снова помещались в раствор. Очищение образцов проводилось под наблюдением. Это связано с тем, что археологические медные предметы часто поражены межкристаллической коррозией, поэтому при длительной выдержке в Трилон-Б может произойти растравливание металла. Раствор препарата, использованный для очистки одного предмета не использовался для очистки других предметов - химические элементы из растворенных продуктов коррозии от одного образца не должны осаждаться на поверхность другого образца, влияя тем самым на результаты анализа.

На рисунке 2 показан вид монеты CR-2 до и после химической очистки.

При проведении исследований каждый анализируемый предмет рассматривался с разных сторон. На поверхностях предметов были выбраны следующие контрольные точки измерения (точки облучения рентгеновским излучением):

Наконечники стрел – посередине каждого наконечника стрелы, между лопастями, с каждой из трех сторон наконечника (точки АН-1-1, АН-1-2 и АН-1-3, АН-2-1, АН-2-2 и АН-2-3, АН-3-1, АН-3-2 и АН-3-3);

Монеты – середина каждой из сторон монет (точки CR-1-1 и CR-1-2, CR-2-1 и CR-2-2, CR-6-1 и CR-6-2, CR-7-1 и CR-7-2, CR-8-1 и CR-8-2, CO-1-1 и CO-1-2, AG-1 и AG-2);



Рис. 2. Вид монеты CR-2 до и после химической очистки

Fig. 2. View of CR-2 coin before and after chemical cleaning

Сурмадон Bowl-1 и сосуд Bowl-2. Точки Bowl-1-1 и Bowl-2-1 – боковая внешняя сторона, Bowl-1-2 и Bowl-2-2 – дно с внешней стороны;

Фрагмент ложечки (Sp). Точки Sp-1 и Sp-2 – центры вогнутой и выпуклой сторон ложечки, соответственно.

Подвеска PA. Точки PA-1-1, PA-2-1 – центр широкой части подвески с обеих сторон подвески (стороны PA-1 и PA-2, соответственно). PA-1-2, PA-2-2 – центр узкой части подвески, 10 мм от основания кольца (стороны PA-1 и PA-2, соответственно).

Результаты элементного анализа состава артефактов показаны в таблицах 1-3, где приведены средние значения концентраций химических элементов в исследованных образцах. Полученные нами результаты сравнены с результатами исследований подобных предметов, сделанных другими исследователями (табл. 4-6).

Наконечники стрел

В таблице 1 приведены результаты анализа обследованных наконечников стрел. В составе металла наконечников кроме меди было выявлено еще 12 химических элементов – Ag, As, Ca, I, Ni, Pb, S, Sb, Sc, Si, Sn, Th. Элементы I, Ni, Sc, Th, являющиеся малыми примесями с $C < 0.1\%$ в таблице не показаны.

В металле наконечников АН-1 и АН-3 преобладает медь, её содержание 97% и 98%, соответственно. В металле наконечника АН-2 обнаружены заметные примеси олова и свинца (в среднем 4,9% и 1,9%). Их можно считать легирующими компонентами, вводимыми в медь для получения бронзы.

Во всех трех наконечниках стрел в небольших количествах присутствует мышьяк (от

0.18% до 1.03%). В медных рудах часто содержится мышьяк в количествах 0.8-5%, поэтому допустимо считать такие малые примеси мышьяка природными примесями, а не введенными легирующими компонентами. Обнаруженное в наконечниках АН-1 и АН-2 серебро (от 0.15% до 0.20%) также является природной примесью (содержание серебра в природном сырье может достигать до 0.6%).

Бытовые предметы

В таблице 2 приведены результаты анализа обследованных бытовых предметов. В составе металла этих изделий кроме меди было выявлено еще 22 химических элемента – Ag, As, Ca, Cl, Co, Fe, I, K, Mn, Mo, Ni, Pb, S, Sb, Sc, Si, Sn, Tb, Th, Ti, V, Zn. Элементы Co, Mn, Mo, Sc, V, являющиеся малыми примесями ($C < 0.1\%$) и I, K, Tb, Th, Ti ($C < 1\%$) в таблице не показаны. Обращает на себя внимание то, что в одном из предметов обнаружено наличие хлора (4.88%) на внутренней стороне ложечки (Sp-1). Считаем это результатом так называемой бронзовой болезни, которая может возникать при контакте медного сплава с хлоридсодержащими веществами в условиях взаимодействия с атмосферной и почвенной влагой и воздухом. В процессе бронзовой болезни на поверхности медесодержащего металла образуется хлорид меди, вызывающий сильную коррозию металла, которая может привести к разъеданию его поверхности. Заметим, что до очистки на внутренней стороне ложечки мы действительно обнаружили каверны, заполненные зеленоватым порошком, что является признаком бронзовой болезни.

Металл, из которого изготовлена ложечка, можно отнести к классу латуней – основной легирующий компонент цинк (в среднем 11.7%), а присутствие олова и свинца заметно меньше (3.5% и 1.4%). Наличие заметного количества цинка (в среднем 2.69%) видно еще только в подвеске PA.

Металл сурмадона Bowl-1, сосуда Bowl-2 и подвески PA можно классифицировать как оловянно-свинцовую бронзу – Bowl Pb 7.7%-23.8%, Sn 5.8%-6.9% и PA Sn 4.8%-5.2%, Pb 2.0%-3.7%.

Монеты

В таблице 3 приведены результаты анализа обследованных медных монет. В составе металла монет кроме меди было выявлено

еще 22 химических элемента - Ag, As, Ba, Ca, Cs, Fe, I, K, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Si, Sn, Tb, Th, Ti, V, Zn, Zr. Элементы Ba, Cs, I, K, P, Sc, Tb, Th, Ti, V, Zr, являющиеся малыми примесями с $C < 0.5\%$ в таблице не показаны. Результаты анализа медных монет позволили разделить их металл на 4 группы.

Медь. Монеты CR-6, CR-7 и CO-1 с содержанием в среднем меди 98.6%, 98.9% и 96.0%, соответственно. Малое количество серебра 0.13% и 0.14%, выявленное в медных монетах CR-6 и CR-7, скорее всего можно объяснить незначительными примесями серебра в слитках меди, из которой изготавливались эти монеты. Серебро могло попасть в эту медь в процессе выплавки меди из серебро-содержащей руды. Также допустимо предположить, что при изготовлении слитков меди был использован лом, содержащий некоторое количество отбракованных посеребренных монет и другие серебро-содержащие изделия.

Бронза свинцово-оловянная. Монета CR-1 с содержанием в среднем меди 51.5%, свинца 25.9%, олова 2.6%. Отличительной особенностью этой монеты являются заметные примеси железа (2.4%), сурьмы (1.3%), мышьяка (1.2%).

Бронза свинцово-оловянно-цинковая. Монета CR-2 с содержанием в среднем меди 67.4%, свинца 12.5%, олова 2.9% и цинка 6.8%. Цинк в этой монете не является основной легирующей примесью, поэтому считаем, что эта монета бронзовая, а не латунная.

Бронза свинцовая. Монета CR-8 с содержанием в среднем меди 77.2%, свинца 8.8%, серебра 6.0%, олово не обнаружено. Мы не считаем, что эта монета сделана из медно-свинцово-серебрянного сплава, так как такие медные монеты (династия Караханидов, Узджанд, Джалал ад-дин Арслан-хакан Ибрагим б. Хусайн) часто делались посеребренными.

Кроме бронзовых монет была обследована монета из серебристого металла (AG). Анализ показал, что это серебряная монета с высоким содержанием серебра (в среднем содержание серебра 95.3%) и незначительными примесями (менее 1%) Au, Ca, Cu, Fe, K, Os, S, Si, Zn. Эта монета была предварительно опознана археологами как серебряный дирхем династии Кунгратов. При анализе монеты на одной стороне (AG-1) неожиданно был обнаружен алюминий - 1.1%. Объяснение этому нашлось

после выяснения условий хранения этой монеты. Она долгое время находилась в контакте с алюминиевой пластиной, что, на наш взгляд, вызвало "загрязнение" алюминием стороны AG-1. Это говорит о том, что не следует допускать прямого контакта различных анализируемых предметов, особенно если эти предметы изготовлены из мягкого металла.

Следует сказать о классификации металла медных и бронзовых изделий, применяемой археологами при изучении находок из древних памятников Центральной Азии, Казахстана, Южного Урала (металл древневосточного типа, металл степных племен и др.). Это разделение металла находок на несколько металлургических групп, о которых упоминается в некоторых публикациях, например (Рузанов, 2013; Епимахов, 2019). Это группы: так называемая "чистая" медь; медь мышьяковистая ($As_{0,1-1,0\%}$); медь серебристая ($Ag_{0,1-1,0\%}$);

Таблица 1. Элементный состав наконечников стрел (среднее содержание элементов в %)
 Table 1. Elemental composition of arrowheads (average elemental concentration in %)

ArH-1-1	96.5	0.19	0.48	0.18	1.3	0.3	0.44		0.58
ArH-1-2	97.6	0.15	0.2	0.15	0.72	0.29	0.38		0.4
ArH-1-3	96.9	0.18	0.18	0.2	1.28	0.28	0.47		0.52
ArH-2-1	91.5	0.15	0.76	0.17	1.62	0.18	0.24	0.62	4.68
ArH-2-2	89.5	0.2	1.03	0.12	2.55	0.42	0.29	0.62	5.09
ArH-2-3	90.9	0.2	0.84	0.13	1.65	0.28	0.22		4.84
ArH-3-1	96.7		0.87	0.12				2.06	0.22
ArH-3-2	98.6		0.77	0.18					0.31
ArH-3-3	98.7		0.91	0.09					0.27
Образец	Cu	Ag	As	Ca	Pb	S	Sb	Si	Sn

бронза оловянная (Sn 0.8-7%); бронза свинцовая (Pb 1-4%); бронза свинцово-оловянная (Sn 0.8-7%, Pb 1-5%); бронза мышьяковистая (As 1-4%); бронза свинцово-мышьяковистая (Pb и As – до 10-12%); бронза оловянно-сурьяно-мышьяковистая (Sn>10%, Sb>1% и As>1%); бронза никелевая (Ni 1,0–5,0%).

Некоторые исследователи иногда упоминают термин "химически чистая медь". Однако надо сказать, что понятие "чистая медь", тем более "химически чистая медь", очень условное, так как практически все изделия с высоким содержанием меди содержат примеси других элементов, например: As (до 3%), Pb (до 3%), Sn (до 0.5%), Ag (до 0.1%) и т.п. (Tylecote, 2002; Рузанов, 2013; Шубин, 2015; Епимахов, 2019; Таиров, Блинов, 2024). Это

связано с тем, что не бывает ни чистой медной руды ни чистой самородной меди. Для примера скажем, что в самородной меди, взятой из различных месторождений Ирана, Родезии, СССР, Турции обнаруживали примеси Ag до 0.6%, As до 1.0%, Pb до 0.3%, Sb до 0.4%, Ni до 0.5%, Zn до 0.1% (Tylecote, 2002). Среднее содержание химических элементов в широко распространенных серых медных рудах может быть: Cu 13.5%, S 23.1%, Fe 19.7%, Sb 5.7%, As 0.9% (от 0.8% до 5%), Zn 1.1% (Tylecote, 2002). В выплавленной меди содержание химических элементов может быть: Cu 90-96%, Fe до 2.4%, S 0.6%, Pb+Sn 0.5% (Tylecote, 2002). Даже в рафинированной меди с содержанием Cu 99.8% могут наблюдаться примеси Fe 0.05%, Sn+Pb 0.04%, Pb 0.05% (Tylecote, 2002). Поэтому вместо термина "химически чистая медь" надо применять термин "технически чистая" медь.

Классификация металла по металлургическим группам давала археологам привязку к рудным источникам, позволяя предполагать место происхождения металла и, возможно, место изготовления металлических изделий. На наш взгляд следует с осторожностью относиться к таким предположениям.

Это связано с тем, что металл в древности имел большую ценность, поэтому древние кузнецы собирали любые металлические отходы плавильного и кузнечного производства, забракованные изделия, обломки орудий труда и оружия, бытовых изделий, поломанные дешевые украшения и прочий лом. Весь этот лом использовался вторично при изготовлении различных металлических изделий. Поэтому металлические находки могут иметь элементный состав, часто не позволяющий однозначно отнести металл к определенным металлургическим

Таблица 2. Элементный состав бытовых изделий (среднее содержание элементов в %)
 Table 2. Elemental composition of household goods (average elemental concentration in %)

Bowl-1-1	0.15	0.56	1.25		63.1	1.01	0.14	15.2		0.73	10.6	6.72	
Bowl-1-2		0.32	3.8		46.1	2.28	0.07	23.8		0.67	14.2	5.97	
Bowl-2-1	0.15	1.3	0.33		77.8	0.1	0.51	7.67		0.67	4.18	5.76	
Bowl-2-2		0.83	0.88		59.8	0.67	0.31	21		0.73	7.2	6.92	
Sp-1		0.24	0.11	4.88	77.6			1.44	0.54		0.71	3.66	10.1
Sp-2			0.13		80.1			1.33			1.14	3.36	13.3
PA-1-1	0.2	1.3	0.2		83	0.2	0.2	3	1.3	1	1.2	5	2.9
PA-1-2	0.2	1.4	0.3		84	0.2	0.2	3.2	1.1	1	0.7	4.8	2.8
PA-2-1	0.2	1.3	0.3		85		0.2	2	1	1	0.8	5.3	2.8
PA-2-2	0.3	1.2	0.6		84		0.2	3.7	1	1	0.8	5	2.3
Образец	Ag	As	Ca	Cl	Cu	Fe	Ni	Pb	S	Sb	Si	Sn	Zn

Таблица 3. Элементный состав медных монет (среднее содержание элементов в %)
 Table 3. Elemental composition of copper coins (average elemental concentration in %)

CR-1-1		1.21	1.19	51.6	2.25	0.18	28.9		1.31	9.5	2.63	0.59	
CR-1-2		1.28	1.62	51.4	2.55	0.16	23		1.33	14.4	2.53	0.57	
CR-2-1		0.5	0.67	65.5	0.36	0.06	15.2		0.21	7.48	3.03	6.25	
CR-2-2		0.61	0.64	69.4	0.21	0.06	9.8		0.17	7.87	2.71	7.27	
CR-6-1	0.22		0.18	98.3		0.06	0.39	0.32	0.22				
CR-6-2	0.12		0.23	97.9		0.07	0.36	0.23	0.2	0.37	0.33		
CR-7-1	0.14		0.11	99.2		0.07	0.26						
CR-7-2	0.14		0.26	98.6		0.07	0.25			0.66			
CR-8-1	6.1	0.4	0.78	70.1	0.28	0.07	11.3		0.51	9.4			
CR-8-2	5.91	0.26	0.22	84.3		0.09	6.34		0.37	2.26			
CO-1-1		0.25	0.22	94.6		0.16	0.22			3.93	0.51		
CO-1-2		0.07	0.18	97.3		0.18	0.27			1.5	0.48		
Образец	Ag	As	Ca	Cu	Fe	Ni	Pb	S	Sb	Si	Sn	Zn	

Таблица 4. Элементный состав некоторых древних наконечников стрел (%) (нд – нет данных)
 Table 4. Elemental composition of ancient arrowheads (%) (нд – no data)

№	Cu	Sn	As	Sb	Pb	Zn	Fe	Ni	Ag
1	нд	1.83			1.85				
2	нд	10.82		8.0				3.68	
3	нд	2.46	0.50		0.56				
4	81.0	18.7			0.05		0.23		
5	99.8						0.15		
6	нд	4.0	1.0	0.06				0.05	
7	нд					4.33-4.44			
8	нд	1.72-5.57				3.09-6.09			
9	99.92						0.08		
10	99.11						0.89		
11	99.52	0.39					0.09		
12	99.67				0.09		0.24		
13	98.66	0.65			0.09		0.60		
14	93.07	1.91	4.52		0.13		0.16		
15	95.18	0.20	4.26		0.09				
16	97.0	0.50	0.29	0.43	1.10			0.06	0.18
17	90.7	4.87	0.88	0.25	1.94				0.18
18	98.0	0.27	0.85					0.08	

группам и осуществить привязку к рудным источникам.

Наконечники стрел.

В таблице 4 для сравнения приведен состав некоторых наконечников стрел, изготовленных в разные исторические периоды в различных государствах. В этой таблице: 1 – китайский наконечник стрелы, династия Шан, 1401-1122 вв. до н.э.; 2 – китайский наконечник стрелы, династия Хань, 206 г. до н.э. – 220 г. н.э.; 3 – японский наконечник стрелы, VII век н.э. (Tylecote, 2002); 4, 5 – наконечники стрел из Центрального Казахстана, VII–VI вв. до н.э. (Tur, 2016); 6 – наконечник стрелы из степной и лесостепной зон Восточной Европы между Днепром и Уралом, вторая половина II – начало I тыс. до н.э. (Шубин, 2015); 7 и 8 – латунные наконечники стрел из Казахстана, конец VIII – первая половина VI вв. до н.э. (Рузанова, Рощина, 2010); 9-15 – из степной и лесостепной зон Южного Зауралья (9 - вторая половина VI – первая половина V вв. до н.э. (Таиров, Блинов, 2024)); 16-18 - наконечники стрел из Средней Азии, VI-III вв. до н.э. (наши результаты, средние значения).

Сравнение результатов показывает, что медные наконечники стрел №16 и 18, найденные в Самаркандской области Узбекистана, по содержанию меди ближе всего по составу к наконечникам из Северного Казахстана (№5) и степной и лесостепной зон Южного

Зауралья (№9-13). Металл таких наконечников археологи относят к условной металлургической группе "чистая медь".

Имеется сходство наконечника №17 из оловянной бронзы с наконечником №6 из степной и лесостепной зон Восточной Европы. Сходство образца №17 прослеживается и с японским наконечником (№3). Имеется существенное различие в содержании олова с бронзовыми наконечниками из Китая (№2, Sn 10.8%) и Северного Казахстана (№4, Sn 18.7%), в которых оно намного выше. Надо заметить, что содержание в бронзе олова порядка 20% обеспечивало максимальную твердость и прочность сплава, а дальнейшее увеличение концентрации олова приводит к снижению прочности бронзы и она становится хрупкой (Tylecote, 2002; Осинцев, Федоров, 2004; Адаскин, 2009).

В самаркандских наконечниках №9 и 10 присутствует примесь свинца (Pb 1.1% и 1.9%), который в схожих концентрациях виден в китайском №1 и японском наконечнике №3.

В обследованных нами наконечниках стрел в небольших количествах присутствует мышьяк (As от 0.3% до 0.9%), видный также в японском наконечнике №3 (As 0.5%) и наконечнике из Восточной Европы №6 (As 1%). Учитывая, что мышьяк в небольших количествах часто может содержаться в медных рудах, допустимо считать такие

Таблица 5. Элементный состав некоторых бронзовых изделий (%) (нд – нет данных)
 Table 5. Elemental composition of some bronze items (%) (нд – no data)

№	Предмет	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	Sb	As	Ag
1	Сосуд	нд	13.07	0.83			0.06			
2	Сосуд	нд	20.32	0.05						
3	Украшение	нд	0.47	0.03		0.21		0,06	0.20	0.01
4	Подвеска	нд							16.2	
5	Подвеска	нд	0.3	0.05				0.04	0.25	
6	Bowl-1	54.6	6.34	19.5		1.64	0.13	0.70	0.44	0.15
7	Bowl-2	68.8	6.34	14.3		0.39	0.41	0.70	1.07	0.15
8	Подвеска РА	83.9	5.01	2.97	2.69	0.23	0.17	0.99	1.28	0.23
9	Ложечка Sp	78.8	3.51	1.38	11.7				0.24	

малые примеси мышьяка природными примесями, а не введенными легирующими компонентами. При этом надо сказать, что мышьяк как и олово делает бронзовый сплав более прочным, улучшает его литейные характеристики и ковкость, поэтому часто использовался в качестве легирующего компонента. Примером могут служить наконечники стрел №14 и №15 из степной зоны Южного Зауралья, сделанные из мышьяковистой бронзы - в них мышьяк является основным легирующим компонентом (Таиров, Блинов, 2024).

Существенное различие самаркандских наконечников стрел видно только с казахстанскими наконечниками стрел №7 и №8, сделанными из латуни. №7 – чистая латунь (Cu+Zn), а №8 - многокомпонентная латунь Cu+Zn+Sn (содержание цинка в образцах №8 было больше содержания олова (Рузанова, Рощина, 2010), то есть цинк является основным легирующим компонентом).

Бытовые предметы

В таблице 5 для сравнения приведем состав некоторых бытовых предметов, изготовленных в разные исторические периоды и в различных государствах. Здесь: 1, 2 - китайские бронзовые сосуды династии Шан, 1401-1122 гг. до н.э.; 3 - украшение, 4 и 5 - подвеска из степной и лесостепной зон Восточной Европы между Днепром и Уралом, вторая половина II - начало I тыс. до н.э. (3-5 из (Шубин, 2015)); 6 - сурмадон Bowl-1, Средняя Азия (XI в. н.э.); 7 - стаканчик Bowl-2, Средняя Азия (XI в. н.э.); 8 - подвеска РА, Средняя Азия (X-XII вв. н.э.); 9 - ложечка Sp, Средняя Азия (VII-VIII вв. н.э.) (6-9 - наши результаты, средние значения).

Сравнивая элементный состав обследованных нами изделий Bowl-1, Bowl-2, РА, Sp с результатами других исследователей можно увидеть следующее.

Сосуды из находок самаркандских археологов сурмадон Bowl-1 (№6) и стаканчик Bowl-2 (№7), сделанные из свинцово-оловянной бронзы, существенно отличаются от китайских сосудов №1 и 2, являющихся изделиями из оловянной бронзы.

Металл подвески РА (№8), представляющий собой многокомпонентную бронзу с заметными примесями олова, свинца, цинка, сурьмы и мышьяка (Sn 5%, Pb 3%, Zn 2.7%, Sb 1%, As 1.3%), также отличается от украшения №3 и подвесок №4 и 5 из степной и лесостепной зон Восточной Европы. Подвеска №4 сделана из мышьяковистой бронзы, украшение №3 и подвеска №5 – из меди с незначительной примесью мышьяка.

Ложечка Sp (№9), сделанная из многокомпонентной латуни (Cu+Zn+Sn+Pb), не имеет аналогий с металлом изделий №1-7.

Исследованные нами предметы Bowl-1, Bowl-2 и РА отличаются от других предметов наличием небольшого количества серебра (0.15-0.23%). Возможно металл представлял собой смесь различных металлов в виде лома, который часто использовался при изготовлении бытовых предметов.

Следует еще раз сказать о хлоре, обнаруженном при анализе ложечки Sp (№9) на одной из её сторон (табл. 2, Sp-1, Cl 4.88%). Встречаются предположения, что повышенное содержание хлора в металле может быть связано с особенностями месторождений медной руды. В таком случае хлор должен выявляться и на другой стороне ложечки. В нашем случае

Таблица 6. Элементный состав некоторых древних медных, бронзовых и серебряных монет (%) (нд – нет данных)

Table 6. Elemental composition of ancient copper, bronze and silver coins (%) (нд – no data)

№	Типе	Au	Ag	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Sb	As	Fe
1	Бронзовая монета			нд	8.3	8.7				0.18	
2	Бронзовая монета			нд	3.2	11.2			0.49	1.5	
3	Бронзовая монета			нд	6.8	21.3		3.04		3.9	
4	Бронзовая монета			нд	1.7	55.4		1.03		0.6	
5	Монета Птолемеев			65.1	5.1	28.8	0.10				
6	Карфагенский фоллис		1.2	81.3	5.5	11.9	0.01				
7	Бронзовая монета CR-1			51.5	2.6	25.9	0.58	0.17	1.32	1.24	2.4
8	Бронзовая монета CR-2			67.4	2.9	12.5	6.8	0.06	0.19	0.56	0.28
9	Бронзовая монета CR-8		6.0	77.2		8.8		0.08	0.44	0.33	0.28
10	Медная монета CR-6		0.13	98.6	0.33	0.31		0.07	0.20		
11	Медная монета CR-7		0.14	98.9		0.26		0.07			
12	Медная монета CO-1			96.0	0.50	0.25		0.17		0.16	
13	Денарий			98.5	1.03	0.51					
14	Денарий	0.53	94.3	4.4	0.23	0.39	-				
15	Греческий статер		94.1	4.0		0.57					
16	Дирхам	0,05	97,6	1,50		0,82					
17	Дирхам	0.18	98.4	1.05		0.13					
18	Дирхам AG	0.67	95.3	0.17			0.07				

хлор не был обнаружен там даже в следовых количествах. Поэтому считаем наличие хлора в ложечке проявлением бронзовой болезни, о чем мы говорили при представлении результатов анализа бытовых предметов.

Монеты

В таблице 6 для сравнения приведем состав некоторых монет, изготовленных в разные исторические периоды и в различных государствах. Здесь: №1 и №2 - японские бронзовые монеты (1835-1870 гг. н.э.); №3 и №4 - китайские бронзовые монеты (770-249 гг. до н.э.); №5 - бронзовая монета Птолемеев, Египет (169-146 гг. до н.э.); №6 - фоллис, Карфаген (307 г. н.э.) (Tylecote, 2002); №7-9 - бронзовые монеты CR-1, CR-2, CR-8 и №10-12 - медные монеты CR-6, CR-7 и CO-1 (наши результаты, средние значения); №13 - медный денарий римского периода (244-249 гг. н.э.), №14 - серебряный денарий римского периода (150 г. до н.э.) и №15 - греческий статер из Коринфа (IV в.) (Tylecote, 2002); №16 и 17 - дирхемы династии Джучидов (Храмченкова и др., 2017); №18 - серебряный дирхем династии Кунгратов (наши результаты, средние значения).

Сравнение результатов наших анализов бронзовых монет CR-1 и CR-2 (№7, 8) с япон-

скими и китайскими монетами, египетской монетой и карфагенским фоллисом (№1-6) показывает, что все эти монеты изготавливались из свинцово-оловянной бронзы с содержанием компонента Pb 8.7% - 55.4% и Sn 1.7% - 8.3%.

Несколько отличается по составу бронзовая монета CR-8 (№9). Она не содержит олова, содержит свинец (Pb 8.8%) и серебро (Ag 6.0%). Можно было бы предположить, что монета изготовлена из медно-свинцово-серебряного сплава. Однако археологи идентифицировали эту монету как посеребренную медную монету династии Караханидов (Узджанд, Джалал ад-дин Арслан-хакан Ибрагим б.Хусайн). Поэтому мы считаем, что монета изготовлена из свинцовой бронзы.

Состав обследованных нами медных монет CR-6, CR-7 и CO-1 (Cu в среднем 98.6%, 98.9% и 96.0%) сравним с составом динария №13 римского периода (Cu 98.5%).

Анализ хорезмского серебряного дирхама AG (№18) династии Кунгратов показывает его сходство с серебряными дирхамами династии Джучидов (№16 и 17). Некоторое различие видно только с серебряными денарием Романского периода и греческим статером (№14

и 15), в которых прослеживается заметное содержание меди (4.4% и 4.0%).

Небольшие примеси других элементов, включая золото (0.05%-0.67%) в динарии №14 и дирхамах №16-18, допускают предположение, что при изготовлении монет кроме основного металла мог дополнительно использоваться также металлический лом из дефектных монет, отходов монетного производства, обломков недорогих украшений и др.

Подведём итоги исследований

Результаты анализов позволили установить, что наконечники стрел АН-1, АН-2 и АН-3 были изготовлены как из меди (АН-1, АН-3, Cu 97-98%), так и оловянной бронзы (АН-2, Cu 90.7%, Sn 4.9%). Во всех наконечниках стрел был обнаружен мышьяк (As от 0.18% до 1.03%). В медных рудах часто содержится мышьяк в количествах 0.8-5%. Это позволяет допустить обнаруженные примеси мышьяка природными примесями, а не введенными легирующими компонентами. В наконечниках АН-1 и АН-2 обнаружены малые примеси серебра (Ag от 0.15% до 0.20%). Их тоже допустимо считать природными примесями, так как содержание серебра в природном сырье может достигать до 0.6%.

Анализ четырех бытовых предметов из медного сплава (сурмадон, стаканчик для мерной гири, подвеска из комплекта женского украшения и фрагмент ложечки) показали, что первые три предмета изготовлены из свинцово-оловянной бронзы со средним содержанием свинца 19.5%, 14.3% и 3.0%, олова 6.3%, 6.3% и 5.0%. Ложечка была изготовлена из латуни, о чем говорит наличие основного легирующего компонента в виде цинка (содержание в среднем 11.7%), а содержание других легирующих примесей заметно меньше – олово в среднем 3.5%, свинец – 1.4%. Наличие хлора в количестве 4.9% на одной из сторон ложечки свидетельствует о том, что

Примечание:

Статья посвящена светлой памяти Муминова Талиба Мусаевича, академика Академии Наук Узбекистана.

ЛИТЕРАТУРА

- Адашкин А.М.* Материаловедение (металлообработка): учебное пособие. М.: Академия, 2009. 288 с.
- Бейсенов А.З., Тишкин А.А.* Бронзовый наконечник стрелы из позвонка мужчины, погребенного в тасмолинском кургане Койтас // Теория и практика археологических исследований. 2022. Т. 34, № 2. С. 172–185.
- Мокрушин И.Г., Красновских М.П., Подосенова Ю.А., Сарпулов А.Н.* Физико-химические методы анализа в археологических исследованиях // Труды КАЭЭ. 2020. Вып. XVII. С. 14–26.

этот предмет был заражен бронзовой болезнью. Высокая доля и разнообразие примесей из железа, никеля, сурьмы, серебра и других химических элементов в сурмадоне, стаканчике для мерной гири, подвеске и ложечке (в среднем до 45%, 31%, 16% и 21%) позволяет допустить, что для изготовления этих бытовых предметов помимо основного металла мог использоваться также металлический лом из бракованных изделий, обломков орудий труда и оружия, сломанных дешевых украшений и пр.

Анализ монет позволил установить, что:

три монеты (CR-1, CR-2, CR-8) сделаны из различных бронзовых сплавов – свинцово-оловянная бронза (CR-1, в среднем Cu 51.5%, Pb 25.9%, Sn 2.6%), свинцово-оловянная-цинковая бронза (CR-2, в среднем Cu 67.4%; Pb 12.5%, Sn 2.9% и Zn 6.8%) и свинцовая бронза (CR-8, в среднем Cu 77.2%, Pb 8.8%);

наличие заметной примеси серебра в монете CR-8 (Ag 6.0%) объясняется тем, что бронзовая монета была при её изготовлении посеребрена;

три монеты (CR-6, CR-7, CO-1) сделаны из условно "чистой" меди (Cu 96%-99%);

монета из серебра (дирхам AG) содержит 95.3% серебра и небольшую примесь золота 0.67%;

наличие алюминия (1.1%) на одной из сторон серебряного дирхама AG объясняется загрязнением монеты, возникшем из-за случайного контакта монеты с алюминиевым предметом;

незначительное количество серебра порядка 0.13%-0.14%, выявленное в медных монетах CR-6 и CR-7, допустимо объяснить природными примесями серебра в медной руде. При этом не следует исключать и того, что такие монеты могли быть изготовлены из смеси меди, бронзы и серебряносодержащего лома.

- Никитин М.К., Мельникова Е.П.* Химия в реставрации. Справочное пособие. Л.: Химия, 1990. 304 с.
- Осинцев О.Е., Федоров В.Н.* Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.
- Рузанов В.Д.* Металлообработка на юге Средней Азии в эпоху бронзы. Самарканд: Институт археологии Академии наук Узбекистана, 2013. 347 с.
- Рузанов В.Д.* Химико-металлургические особенности изделий из цветных металлов кочевых племен Северной Бактрии в кушанское время // Археология Узбекистана. 2021. № 24. С. 12–24.
- Рузанов В.Д., Анарбаев А.А., Реутова М.А.* Химико-металлургические характеристики металла Бричмуллинского клада // История материальной культуры Узбекистана. Вып. 35 / Отв. ред. Ш.Р. Пидаев Ташкент: Фан, 2006. С. 79–82.
- Рузанова С.А.* Металлопроизводство на территории Северной Бактрии (результаты исследования материалов с поселения Кампыртепа) // Проблемы истории, филологии, культуры. 2016. № 4. С. 20–33.
- Рузанова С.А., Роцина С.А.* Химический состав металла наконечников стрел из могильника Южный Тагискен // Археология и палеоантропология евразийских степей и сопредельных территорий / МИАР. Вып. 13 / Отв. ред. М.М. Герасимова, В.Ю. Малашев, М.Г. Мошкова. М.: Таус, 2010. С. 431–437. Доступно по: URL <http://archaeologysa.su/?p=1257> (дата обращения 02.02.2024).
- Сабирова Т.М.* Состав металла фибул Среднего Прикамья (по материалам коллекции УдГУ) // Поволжская археология. 2019. № 1 (27). С. 180–193.
- Таиров А.Д., Блинов И.А.* Состав металл предметов из случайных находок на территории степной и лесостепной зон Южного Зауралья // Археология Евразийских степей. 2024. № 1. С. 237–255.
- Храмченкова Р.Х., Шайхутдинова Е.Ф., Бугарчев А.И., Петров П.Н., Ситдииков А.Г.* Сравнительный анализ химического состава и структуры пореформенных серебряных монет Джучидов (по материалам раскопа CLXXIX Болгарского городища) // Нумизматические чтения Государственного исторического музея 2017 года. Москва, 23 и 24 ноября 2017 г. Материалы докладов и сообщений / Отв. ред. Е.В. Захаров. М.: РИА Внешторгиздат, 2017. С. с.
- Шайхутдинова Е.Ф., Храмченкова Р.Х., Хасанов Р.Р., Мухаметшин Д.Г., Ситдииков А.Г.* Серебровисмутовая монета X в. эмиров Андалабы. // Нумизматические чтения Государственного исторического музея 2017 года. Москва, 23 и 24 ноября 2017 г. Материалы докладов и сообщений / Отв. ред. Е.В. Захаров. М.: РИА Внешторгиздат, 2017. С.69–74.
- Шемаханская М.С.* Реставрация металла: методические рекомендации. М: ВНИИР, 1989. 156с.
- Шубин Ю.П.* К вопросу о химическом составе металлических изделий эпохи энеолита-бронзы Днепро-Донского региона // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2015. № 1 (44). С. 76–81.
- Южный Урал в начале эпохи металлов. Бронзовый век / История Южного Урала. Т. 2 / Науч. ред. А.В. Епимахов; отв. за выпуск Н.О.Иванова. и др. Челябинск: ЮУрГУ, 2019. 432 с.
- Bottaini C.E., A.L.M. Silva, D.S. Covita, L.M. Moutinhob, J.F.C.A. Veloso.* 2012. Energy dispersive X-ray fluorescence analysis of archeological metal artifacts from the Final Bronze Age // X-Ray Spectrometry. 41, 144–149.
- Daly K., Fenelon A.* 2018. Application of Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectrometry to the Determination of Copper, Manganese, Zinc, and Sulfur in Grass (*Lolium perenne*) in Grazed Agricultural Systems // Applied Spectroscopy. V.72, No.11, 1661-1673.
- Mantler M., M. Schreiner.* 2000. X-Ray Fluorescence Spectrometry in Art and Archaeology // X-Ray Spectrometry. 29, 3–17.
- Tylecote R.F.* A history of metallurgy. Second Edition. London: Maney Publishing for the Institute of Materials, 2002. 205 p.
- Tur S.S., Svyatko S.V., Beisenov A.Z., Tishkin A.A.* 2016. An Exceptional Case of Healed Vertebral Wound with Trapped Bronze Arrowhead: Analysis of a 7th–6th c. BC Individual from Central Kazakhstan // International Journal of Osteoarchaeology. 26(4), 740-746.
- Young S.G., J. Valdez, M. Espy, A. Edgar, J. Brett, M.T. Pettes, C. Mathers, M. Barbour, B.M. Patterson.* 2023. Analysis of Coronado State Historic Site artifacts using X-rays // X-Ray Spectrometry. 1-14. <https://doi.org/10.1002/xrs.3350>.

Информация об авторах:

Шаронов Иосиф Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, зав. ядерно-физической лабораторией, Самаркандский государственный университет; (г. Самарканд, Узбекистан); jsharonov@gmail.com

Алибеков Акбар Сувонович, младший научный сотрудник ядерно-физической лаборатории, Самаркандский государственный университет (г. Самарканд, Узбекистан); akbaralibekov@gmail.com

Атаходжаев Анвар Хашимович, кандидат исторических наук, старший научный сотрудник, зав. отделом, Самаркандский институт археологии (г. Самарканд, Узбекистан); aakh9208@gmail.com

Реутова Марина Аркадьевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией химико-технологического исследования, реставрации и консервации археологических материалов, Самаркандский институт археологии (г. Самарканд, Узбекистан); mreutova@gmail.com

Музаффаров Амрулло Мустафаевич, доктор технических наук, главный инженер Центральной научно-исследовательской лабораторией Навоийского горно-металлургического комбината (г. Навои, Узбекистан); amrullomuzaffarov@gmail.com

REFERENCES

Adaskin, A. M. 2009. *Materialovedenie (metalloobrabotka) (Materials science (metalworking))*. Moscow: "Akademiya" Publ. (in Russian).

Beisenov, A. Z., Tishkin, A. A. 2022. In *Teoriia i praktika arkheologicheskikh issledovaniy (Theory and Practice of Archaeological Research)* 34 (2), 172–185 (in Russian).

Mokrushin, I. G., Krasnovskikh, M. P., Podosenova, Yu. A., Sarapulov, A. N. 2020. In *Trudy Kamskoi arkheologo-etnograficheskoi ekspeditsii (Proceedings of the Kama Archaeological and Ethnographical Expedition)* 17, 14–26 (in Russian).

Nikitin, M. K., Mel'nikova, E. P. 1990. *Khimiia v restavratsii (Chemistry in Restoration)*. Leningrad: "Khimiiia" Publ. (in Russian).

Osintsev, O. E., Fedorov, V. N. 2004. *Med' i mednye splavy. Otechestvennye i zarubezhnye marki (Copper and copper alloys. Russian and foreign grades)*. Moscow: "Mashinostroenie" Publ. (in Russian).

Ruzanov, V. D. 2013. *Metalloobrabotka na yuge Sredney Azii v epokhu bronzy (Metalworking in the south of Central Asia in the Bronze Age)*. Samarkand: Institute of Archaeology, Academy of Sciences of Uzbekistan (in Russian).

Ruzanov, V. D. 2021. In *Arkheologiya Uzbekistana (Archaeology of Uzbekistan)* (24), 12–24 (in Russian).

Ruzanov, V. D., Anarbaev, A. A., Reutova, M. A. 2006. In Pidaev, Sh. R. (ed.). *Istoriia material'noi kul'tury Uzbekistana (History of Material Culture of Uzbekistan)* 35. Tashkent: "Fan" Publ., 79–82 (in Russian).

Ruzanova, S. A. 2016. In *Problemy istorii, filologii, kul'tury (Journal of Historical, Philological and Cultural Studies)* (4), 20–33 (in Russian).

Ruzanova, S. A., Roshchina, S. A. 2010. In Gerasimova, M. M., Malashev, V. Yu., Moshkova, M. G. (eds.). *Arkheologiya i paleoantropologiya evraziiskikh stepei i sopredel'nykh territorii (Archaeology and Paleoanthropology of Eurasian Steppes and Adjacent Territories)*. Series: Materialy i issledovaniia po arkheologii Rossii (Materials and Studies in the Russian Archaeology) 13. Moscow: "Taus" Publ., 431–437 (in Russian).

Sabirova, T. M. 2019. In *Povolzhskaya arkheologiya (Volga River Region Archaeology)* 27 (1), 180–193 (in Russian).

Tairov, A. D., Blinov, I. A. 2024. In *Arkheologiya Evraziiskikh stepei (Archaeology of Eurasian Steppes)* 1, 237–255 (in Russian).

Shaykhutdinova, E. F., Khamchenkova, R. Kh., Khasanov, R. R., Mukhametshin, D. G., Sitdikov, A. G. 2017. In Zakharov, E. V. (ed.). *Numizmaticheskie chteniya Gosudarstvennogo istoricheskogo muzeya 2017 goda (Numismatic Readings of the State Historical Museum of 2017)*. Moscow: "Vneshtorgizdat" Publ., 69–74 (in Russian).

Shaykhutdinova, E. F., Khamchenkova, R. Kh., Khasanov, R. R., Mukhametshin, D. G., Sitdikov, A. G. 2017. In Zakharov, E. V. (ed.). *Numizmaticheskie chteniya Gosudarstvennogo istoricheskogo muzeya 2017 goda (Numismatic Readings of the State Historical Museum of 2017)*. Moscow: "Vneshtorgizdat" Publ., 69–74 (in Russian).

Shemakhanskaya, M. S. 1989. *Restavratsiya metala: metodicheskie rekomendatsii (Metal Restoration: Methodological Recommendations)*. Moscow: "VNIIR" Publ. (in Russian).

Shubin, Yu. P. 2015. In *Sbornik nauchnykh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (Collection of scientific papers of the Donbass State Technical University)* 44 (1), 76–81 (in Russian).

Epimakhov, A. V., Ivanova, N. O. (eds.). 2019. *Yuzhnyy Ural v nachale epokhi metallov. Bronzovyy vek (The Southern Urals at the beginning of the metal age. The Bronze Age)*. Series: Istoriya Yuzhnogo Urala (History of the Southern Urals). 2. Chelyabinsk: South Ural State University (in Russian).

Bottaini, C. E., Silva, A. L. M., Covita, D. S., Moutinhob, L. M., Veloso, J. F. C. A. 2012. In *X-Ray Spectrometry*. 41, 144–149.

Daly, K., Fenelon, A. 2018. In *Applied Spectroscopy*. Vol. 72, no 11, 1661–1673.

Mantler, M., Schreiner, M. 2000. In *X-Ray Spectrometry*. 29, 3–17.

Tylecote, R. F. 2002. *A history of metallurgy*. Second Edition. London: Maney Publishing for the Institute of Materials.

Tur, S. S., Svyatko, S. V., Beisenov, A. Z., Tishkin, A. A. 2016. In *International Journal of Osteoarchaeology*. 26 (4), 740–746.

Young, S. G., Valdez, J., Espy, M., Edgar, A., Brett, J., Pettes, M.T., Mathers, C., Barbour, M., Patterson, B.M. 2023. In *X-Ray Spectrometry*. 1–14. <https://doi.org/10.1002/xrs.3350>.

About the Authors:

Sharonov Iosif A., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Head of Nuclear Physics Laboratory, Samarkand State University; 15 University Boulevard, Samarkand, 140104, Uzbekistan; jsharonov@gmail.com

Alibekov Akbar S., Junior Researcher, Nuclear Physics Laboratory, Samarkand State University; 15 University Boulevard, Samarkand, 140104, Uzbekistan; akbaralibekov@gmail.com

Atakhodjaev Anvar Kh., Candidate of Historical Sciences, Senior Researcher, Head of Department, Samarkand Institute of Archaeology; 3 Abdullaev St., Samarkand, 140061, Uzbekistan; aakh9208@gmail.com

Reutova Marina A., Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Head of Laboratory of Chemical-Technological Research, Restoration and Conservation of Archaeological Materials, Samarkand Institute of Archaeology; 3 Abdullaeva St., Samarkand, 140061, Uzbekistan; mreutova@gmail.com

Muzaffarov Amrullo M., Doctor of Technical Sciences, Chief Engineer, Central Research Laboratory, Navoi Mining and Metallurgical Combine; 27 Navoi St., Navoi, 210100, Navoi, Uzbekistan; amrullomuzaffarov@gmail.com



Статья поступила в журнал 01.08.2024 г.
Статья принята к публикации 01.10.2024 г.
Авторы внесли равноценный вклад в работу