

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
ТЮМЕНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

## ВЕСТНИК АРХЕОЛОГИИ, АНТРОПОЛОГИИ И ЭТНОГРАФИИ

*Сетевое издание*

**№ 1 (68)  
2025**

ISSN 2071-0437 (online)

Выходит 4 раза в год

**Главный редактор:**

Зах В.А., д.и.н., ТюмНЦ СО РАН

**Редакционный совет:**

Молодин В.И., председатель совета, академик РАН, д.и.н., Ин-т археологии и этнографии СО РАН;  
Добровольская М.В., чл.-корр. РАН, д.и.н., Ин-т археологии РАН;  
Бауло А.В., д.и.н., Ин-т археологии и этнографии СО РАН;  
Бороффа Н., PhD, Германский археологический ин-т, Берлин (Германия);  
Епимахов А.В., д.и.н., Ин-т истории и археологии УрО РАН;  
Кокшаров С.Ф., д.и.н., Ин-т истории и археологии УрО РАН; Кузнецов В.Д., д.и.н., Ин-т археологии РАН;  
Лакельма А., PhD, ун-т Хельсинки (Финляндия); Матвеева Н.П., д.и.н., ТюмГУ;  
Медникова М.Б., д.и.н., Ин-т археологии РАН; Томилов Н.А., д.и.н., Омский ун-т;  
Хлахула И., Dr. hab., ун-т им. Адама Мицкевича в Познани (Польша); Хэнкс Б., PhD, ун-т Питтсбурга (США);  
Чикишева Т.А., д.и.н., Ин-т археологии и этнографии СО РАН

**Редакционная коллегия:**

Дегтярева А.Д., зам. гл. ред., к.и.н., ТюмНЦ СО РАН; Костомарова Ю.В., отв. секретарь, ТюмНЦ СО РАН;  
Пошехонова О.Е., отв. секретарь, ТюмНЦ СО РАН; Лискевич Н.А., отв. секретарь, к.и.н., ТюмНЦ СО РАН;  
Агапов М.Г., д.и.н., ТюмГУ; Адаев В.Н., к.и.н., ТюмНЦ СО РАН;  
Бейсенов А.З., к.и.н., НИЦИА Бегазы-Тасмола (Казахстан); Валь Й., PhD, О-во охраны памятников  
Штутгарта (Германия); Зимина О.Ю., к.и.н., ТюмНЦ СО РАН; Ключева В.П., к.и.н., ТюмНЦ СО РАН;  
Крийска А., PhD, ун-т Тарту (Эстония); Крубези Э., PhD, проф., ун-т Тулузы (Франция);  
Кузьминых С.В., к.и.н., Ин-т археологии РАН; Перерва Е.В., к.и.н., Волгоградский ун-т;  
Печенкина К., PhD, ун-т Нью-Йорка (США); Пинхаси Р., PhD, ун-т Дублина (Ирландия);  
Рябогина Н.Е., к.г.-м.н., ун-т Гетеборга; Слепченко С.М., к.б.н., ТюмНЦ СО РАН;  
Ткачев А.А., д.и.н., ТюмНЦ СО РАН; Хартанович В.И., к.и.н., МАЭ (Кунсткамера) РАН

Утвержден к печати Ученым советом ФИЦ Тюменского научного центра СО РАН

Сетевое издание «Вестник археологии, антропологии и этнографии»  
зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций; регистрационный номер: серия Эл № ФС77-82071 от 05 октября 2021 г.

Адрес: 625008, Червишевский тракт, д. 13, e-mail: [vestnik.ipos@inbox.ru](mailto:vestnik.ipos@inbox.ru)

Адрес страницы сайта: <http://www.ipdn.ru>

© ФИЦ ТюмНЦ СО РАН, 2025

FEDERAL STATE INSTITUTION  
FEDERAL RESEARCH CENTRE  
TYUMEN SCIENTIFIC CENTRE  
OF SIBERIAN BRANCH  
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**VESTNIK ARHEOLOGII, ANTROPOLOGII I ETNOGRAFII**

ONLINE MEDIA

**№ 1 (68)  
2025**

ISSN 2071-0437 (online)

There are 4 numbers a year

**Editor-in-Chief**

Zakh V.A., Doctor of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

**Editorial Council:**

Molodin V.I. (Chairman of the Editorial Council), member of the RAS, Doctor of History,  
Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS (Novosibirsk, Russia)

Dobrovolskaya M.V., Corresponding member of the RAS, Doctor of History,  
Institute of Archaeology of the RAS (Moscow, Russia)

Baulo A.V., Doctor of History, Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS (Novosibirsk, Russia)

Boroffka N., PhD, Professor, Deutsches Archäologisches Institut (German Archaeological Institute) (Berlin, Germany)

Chikisheva T.A., Doctor of History, Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS (Novosibirsk, Russia)

Chlachula J., Doctor hab., Professor, Adam Mickiewicz University in Poznan (Poland)

Epimakhov A.V., Doctor of History, Institute of History and Archeology Ural Branch RAS (Yekaterinburg, Russia)

Koksharov S.F., Doctor of History, Institute of History and Archeology Ural Branch RAS (Yekaterinburg, Russia)

Kuznetsov V.D., Doctor of History, Institute of Archeology of the RAS (Moscow, Russia)

Hanks B., PhD, Professor, University of Pittsburgh (Pittsburgh, USA)

Lahelma A., PhD, Professor, University of Helsinki (Helsinki, Finland)

Matveeva N.P., Doctor of History, Professor, University of Tyumen (Tyumen, Russia)

Mednikova M.B., Doctor of History, Institute of Archaeology of the RAS (Moscow, Russia)

Tomilov N.A., Doctor of History, Professor, University of Omsk

**Editorial Board:**

Degtyareva A.D., Vice Editor-in-Chief, Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Kostomarova Yu.V., Assistant Editor, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Poshekhonova O.E., Assistant Editor, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Liskevich N.A., Assistant Editor, Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Agapov M.G., Doctor of History, University of Tyumen (Tyumen, Russia)

Adaev V.N., Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Beisenov A.Z., Candidate of History, NITSIA Begazy-Tasmola (Almaty, Kazakhstan),

Crubezy E., PhD, Professor, University of Toulouse (Toulouse, France)

Kluyeva V.P., Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Kriiska A., PhD, Professor, University of Tartu (Tartu, Estonia)

Kuzminykh S.V., Candidate of History, Institute of Archaeology of the RAS (Moscow, Russia)

Khartanovich V.I., Candidate of History, Museum of Anthropology and Ethnography RAS Kunstkamera  
(Saint Petersburg, Russia)

Pechenkina K., PhD, Professor, City University of New York (New York, USA)

Pererva E.V., Candidate of History, University of Volgograd (Volgograd, Russia)

Pinhasi R., PhD, Professor, University College Dublin (Dublin, Ireland)

Ryabogina N.Ye., Candidate of Geology, Göteborgs Universitet (Göteborg, Sweden)

Slepchenko S.M., Candidate of Biology, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Tkachev A.A., Doctor of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Wahl J., PhD, Regierungspräsidium Stuttgart Landesamt für Denkmalpflege

(State Office for Cultural Heritage Management) (Stuttgart, Germany)

Zimina O.Yu., Candidate of History, Tyumen Scientific Centre SB RAS (Tyumen, Russia)

Address: Chervishevskiy trakt, 13, Tyumen, 625008, Russian Federation; mail: [vestnik.ipos@inbox.ru](mailto:vestnik.ipos@inbox.ru)

URL: <http://www.ipdn.ru>

Дегтярева А.Д.<sup>a,\*</sup>, Губин А.А.<sup>b</sup>, Блинов И.А.<sup>c</sup><sup>a</sup> ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН  
ул. Червишевский тракт, 13, Тюмень, 625008<sup>b</sup> Тюменский государственный университет  
ул. Володарского, 6, Тюмень, 625003<sup>c</sup> ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, тер. Ильменский заповедник, Миасс, 456317E-mail: [adegtyareva126@gmail.com](mailto:adegtyareva126@gmail.com) (Дегтярева А.Д.);[a.a.gubin@utmn.ru](mailto:a.a.gubin@utmn.ru) (Губин А.А.);[ivan\\_a\\_blinov@mail.ru](mailto:ivan_a_blinov@mail.ru) (Блинов И.А.)

## ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛ ПЕТРОВСКОЙ КУЛЬТУРЫ ЮЖНОГО ЗАУРАЛЬЯ И СРЕДНЕГО ПРИТОБОЛЬЯ ПО ДАННЫМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

*Приведены результаты аналитического изучения медных и бронзовых изделий петровской культуры XIX–XVIII вв. до н.э. с использованием сканирующей электронной микроскопии. Выборка представлена орудиями труда, слитками, предметами вооружения и украшениями, происходящими из материалов поселений и могильников Южного Зауралья и Среднего Притоболья (54 экз.). Произведена визуализация поверхности изделий с изучением топологии распределения элементного состава и структуры металла во вторичных (SE) и обратно отраженных (BSE) электронах для выявления фазового состава образцов. Полученные результаты позволили заключить, что в этот период началось широкое освоение ковеллин-халькозиновых, а также блеклых руд с борнитом, галенитом, возможно, и пород из зон окисления колчеданных залежей, наряду с использованием минералов из верхней части зоны окисления — малахита, азурита, тенорита. Подобные инновационные сдвиги в технологии горного дела привели к значительному усовершенствованию литья и приемов обработки металла. При выплавке металла в составе шихты использовались медные руды, обогащенные мышьяковистыми минералами, — арсенаты и арсениды совместно с оловосодержащими рудами. Источниками оловянных бронз являлись месторождения Северного и Центрального Казахстана, где руды представлены как чистым касситеритом, так и полиметаллическими ассоциациями с сульфидами. Обмен слитками и готовыми изделиями из сплавов Cu+Sn, Cu+Sn+As достаточно интенсивно развивался в широтном, в основном западном, направлении.*

**Ключевые слова:** Южное Зауралье, петровская культуры, эпоха бронзы, сканирующая электронная микроскопия, древняя металлургия, типы сырьевых источников.

Ссылка на публикацию: Дегтярева А.Д., Губин А.А., Блинов И.А. Цветной металл петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Притоболья по данным сканирующей электронной микроскопии // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2025. 1. С. 17–32. <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2025-68-1-2>

Металлографическое исследование срезов металлических изделий направлено на изучение внутренней структуры металла с точки зрения выявления литейных технологий, степени деформации в процессековки, приемов термообработки, температуры отжигов [Лившиц, 1990]. Количественное определение элементного состава фазовых составляющих и включений зачастую невозможно. Идентифицируются лишь включения  $\text{Cu}_2\text{O}$ , эвтектоида  $\alpha\text{-Cu}_3\text{Sn}_8$ , эвтектики  $\text{Cu+Cu}_3\text{As}$ , которые имеют характерную окраску в поляризованном свете или дифференцированное строение, различающееся по цвету и насыщенности. Содержание куприта, легирующих компонентов обычно достаточно точно определяют по эталонам или площади, занимаемой ими, в случае если металл не подвергнулся отжигам гомогенизации и структура не приведена в равновесное состояние [Равич, 1983]. Аналитические исследования методами сканирующей электронной микроскопии с замерами энергодисперсионным анализатором (СЭМ-ЭДА) поверхности шлифов позволяют определить наблюдаемые включения, а также измерить концентрации легирующих компонентов в первичной  $\alpha$ -фазе, на осях дендритов, в разных зонах эвтектоида или эвтектики, которые зачастую отличаются достаточно большим разбросом значений, а также идентифицировать прочие наблюдаемые включения.

\* Corresponding author.

## Материалы

В работе приведены результаты аналитического изучения изделий петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Притоболья (43 экз.), которые были обобщены с ранее опубликованными данными анализа СЭМ изделий петровской культуры (11 экз.) [Дегтярева и др., 2022]. Выборка представлена орудиями труда, слитками, предметами вооружения, украшениями, происходящими из материалов поселений Кулевчи 3, Устье 1, Убаган 2, 3, Нижнеингальское 1, Старокумлякское, Камышное 1, могильников Озерное 1, Кривое Озеро, Убаган 1, Верхняя Алабуга (табл. 1, рис. 1). Предметы ранее проанализированы методами спектрального, атомно-эмиссионного спектрометрического и рентгенофлуоресцентного анализа (табл. 2) [Дегтярева, Кузьминых, 2022].

Таблица 1

### Распределение медных и бронзовых изделий петровской культуры по памятникам

Table 1

Distribution of copper and bronze items of the Petrovka Culture by sites

Памятник	Слитки	Орудия труда	Предметы вооружения	Украшения	Медь с купритом и S	Медь с сульфидами	Бронза	Всего
<b>Южное Зауралье</b>								
Пос. Кулевчи 3	9	9	—	—	3	11	4	18
Пос. Устье 1	3	9	—	—	—	9	3	12
Пос. Старокумлякское 1	—	1	—	—	—	1	—	1
Мог. Кривое Озеро	—	2	1	—	—	—	3	3
<b>Всего</b>	<b>12</b>	<b>21</b>	<b>1</b>	<b>—</b>	<b>3</b>	<b>21</b>	<b>10</b>	<b>34</b>
<b>Среднее Притоболье</b>								
Пос. Убаган 2	1	2	—	1	—	1	3	4
Пос. Убаган 3	2	—	—	1	1	1	1	3
Пос. Камышное 1	1	—	—	—	—	—	1	1
Пос. Нижнеингальское 1	—	1	—	—	1	—	—	1
Мог. Верхняя Алабуга	—	1	—	5	—	2	4	6
Мог. Убаган 1	—	—	1	—	—	—	1	1
Мог. Озерное 1	2	1	—	1	1	1	2	4
<b>Всего</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>20</b>
<b>Итого</b>	<b>18</b>	<b>26</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>26</b>	<b>22</b>	<b>54</b>

## Методика исследования

Аналитические исследования выполнены с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3 LMU с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments Analytical Ltd. (ТюмГУ, НОЦ Нанотехнологии). Для анализа использованы металлографические шлифы — срезы слитков, орудий, украшений, запаянные в протакрил, заполированные и протравленные для обнаружения строения металла — в литом, деформированном состоянии, после термообработки, выявления фазовых составляющих. Электрический контакт обеспечивался за счет напыления проводящего слоя серебром. В процессе работ произведена визуализация поверхности изделий с изучением топологии распределения элементного состава и структуры металла во вторичных (SE) и обратно отраженных (BSE) электронах для выявления фазового состава образца на уровне разрешения до 1–2 нм. С использованием катода Шоттки получены электронные изображения (увеличение 700×, 1600×) и выполнен анализ химического состава с применением ПО TESCAN Essence™ с предустановленными эталонами. Параметры анализа: ускоряющее напряжение — 20 кВ, время выдержки на пикселе — 0,1 с. Точечные замеры проводились по центру включений и зерен, в стороне от межкристаллитных границ, где возможен выраженный рельеф. Картирование распределения химических элементов осуществлялось на 3–4 участках шлифа с определением состава в 5 точках с учетом охвата различных фазовых составляющих и включений (предел обнаружения — 0,1 мас. %). Таким образом, суммарно на каждом образце сделано по 15 замеров. Полученные данные сопоставлены с результатами металлографического исследования этих же изделий в виде особенностей микроструктурных данных по распределению включений и фазового состава (ТюмНЦ СО РАН; микроскоп Axio Observer D1m фирмы Zeiss; микротвердомер ПМТ-3М фирмы «ЛОМО»).

Цветной металл петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Приоболья...

Таблица 2

Результаты спектрального, атомно-эмиссионного спектрометрического и рентгено-флуоресцентного анализов изделий петровской культуры Южного Зауралья \*

Table 2

Results of spectral, atomic emission spectrometric and X-ray fluorescence analyses of the products of the Petrovka Culture of the Southern Trans-Urals

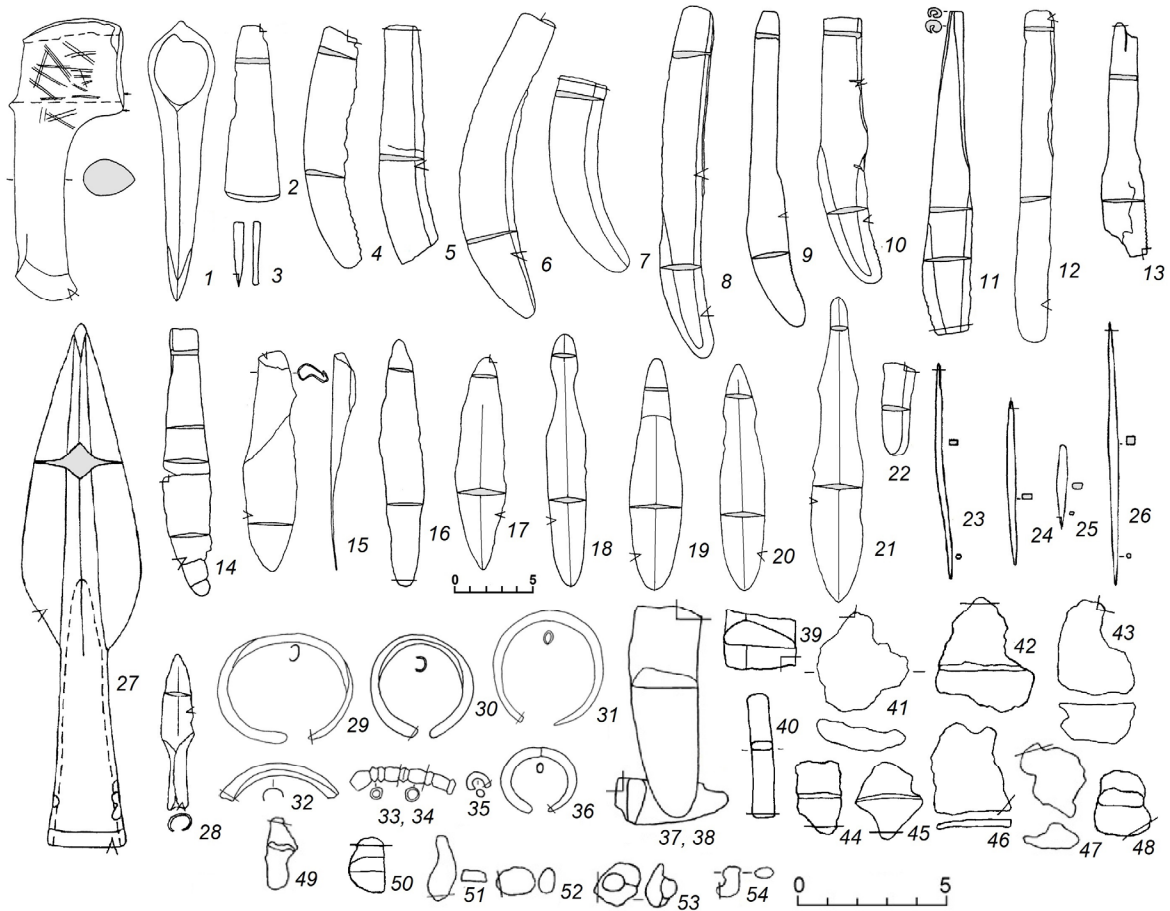
№	Предмет	Памятник	№ рис.	№ спект. анал.	№ структур. анал.	Cu	Sn	Pb	Zn	Bi	Ag	Sb	As	Fe	Ni	Co	Au
<b>Изделия из меди с купритом</b>																	
1.	Слиток	Убаган 3	1, 52	400	940	Осн.	0,047	0,182	0,067	<0,001	0,009	<0,05	<0,02	0,160	<0,001	<0,005	<0,001
2.	Слиток	Озерное 1	1, 50	49876	1198	Осн.	—	0,06	0,02	0,03	0,03	0,06	0,03	0,16	—	—	—
3.	Слиток	Кулевчи 3	1, 49	29416	370	Осн.	<0,0005	0,4	0,005	<0,0002	<0,0003	0,0015	0,04	0,06	0,0015	<0,001	—
4.	Нож	Нижнеингалское 1	1, 15	49760	1140	Осн.	—	0,07	0,09	0,03	0,04	0,09	0,01	1,42	—	—	—
<b>Изделия из меди с купритом и сульфидами</b>																	
5.	Слиток	Кулевчи 3	1, 43	29372	374	Осн.	0,002	0,004	—	—	<0,0003	—	?	0,017	0,004	<0,001	—
6.	Нож	Кулевчи 3	1, 22	29394	355	Осн.	<0,0008	0,01	?	<0,0002	>0,0001	—	—	<0,003	0,0015	<0,001	—
<b>Слитки из меди с сульфидами</b>																	
7.	Слиток	Кулевчи 3	1, 42	29411	366	Осн.	?	0,004	—	—	0,05	—	—	0,4	0,003	<0,003	—
8.	Слиток	Кулевчи 3	1, 44	29413	368	Осн.	<0,0005	0,004	—	—	0,05	—	—	0,35	0,003	<0,001	—
9.	Слиток	Кулевчи 3	1, 45	29414	369	Осн.	3,0	0,045	—	0,018	0,01	0,035	0,75	0,9	0,05	<0,001	0,01
10.	Слиток	Кулевчи 3	1, 46	29415	372	Осн.	?	0,004	—	?	0,04-0,05	—	—	0,4	0,003	<0,001	—
11.	Слиток	Устье 1	1, 37	38556	458	Осн.	0,0013	0,0001	0,0017	0,0036	0,038	—	0,0046	0,028	0,0043	0,0011	0,0002
12.	Слиток	Устье 1	1, 38	38557	458a	Осн.	0,0016	0,0001	0,0012	0,0045	0,058	—	0,0046	0,028	0,0043	0,0011	0,0003
13.	Слиток	Устье 1	1, 39	024	467	Осн.	0,004	0,005	0,07	0,2	0,02	0,005	0,01	0,03	0,0005	<0,004	0,002
14.	Слиток	Убаган 3	1, 54	401	941	Осн.	0,031	0,052	0,113	<0,001	0,004	<0,01	<0,01	1,570	<0,001	<0,005	<0,001
15.	Слиток	Убаган 2	1, 51	406	962	Осн.	0,156	0,133	0,066	<0,001	0,008	<0,01	<0,01	2,170	<0,001	<0,005	<0,001
<b>Орудия труда из меди с сульфидами</b>																	
16.	Топор	Кулевчи 3	1, 1	29421	345	Осн.	0,0015	0,006	0,01	?	0,0007	?	0,035	0,08	0,01	<0,001	—
17.	Нож	Кулевчи 3	1, 8	30973	346	Осн.	0,025	0,07	?	<0,0007	0,003	0,0015	0,02	0,06	0,004	?	—
18.	Нож	Кулевчи 3	1, 12	29427	347	Осн.	0,12	0,08	—	0,0007	0,0005	?	0,015	0,05	0,0015	?	—
19.	Нож	Кулевчи 3	1, 10	29418	348	Осн.	0,001	0,001	—	?	>0,0001	—	—	0,3	0,0015	<0,001	—
20.	Нож	Старокумляское	1, 14	29428	356	Осн.	0,03	0,03	?	0,005	0,015	—	0,03	0,035	0,003	<0,001	—
21.	Нож	Устье 1	1, 9	017	460	Осн.	0,07	0,02	0,05	0,0002	0,001	<0,01	0,01	0,2	0,005	<0,001	<0,001
22.	Нож	Устье 1	1, 11	027	480	Осн.	0,003	0,01	0,15	0,0002	0,002	<0,01	<0,01	0,02	0,002	0,0004	<0,001
23.	Нож	Озерное 1	1, 19	49871	1193	Осн.	0,03	0,09	—	0,07	0,06	0,14	0,02	0,32	—	—	—
24.	Серп	Кулевчи 3	1, 7	29384	351	Осн.	0,0007	0,001	—	?	?	—	—	0,8	0,018	<0,001	—
25.	Серп	Кулевчи 3	1, 5	29424	352	Осн.	0,025	0,05	?	0,005	0,005	0,001	—	<0,004	0,003	<0,001	—
26.	Серп	Устье 1	1, 6	010	454	Осн.	0,1	0,02	0,02	0,002	0,001	<0,01	0,04	1,4	0,001	<0,001	<0,001
27.	Серп	Устье 1	1, 4	013	457	Осн.	0,5	0,04	0,025	0,05	0,04	0,01	0,08	0,03	0,003	<0,0004	0,001
28.	Пила	Кулевчи 3	1, 13	29426	354	Осн.	0,1	0,012	0,007	<0,0003	<0,0003	0,001	—	0,7	0,005	<0,001	—
29.	Шило	Устье 1	1, 26	023	466	Осн.	0,03	0,04	0,06	0,0002	0,004	<0,001	0,04	0,4	0,003	<0,004	<0,001
30.	Шило	Устье 1	1, 23	38534	488	Осн.	—	0,037	—	—	0,0037	0,0046	—	0,017	0,0007	0,001	—
<b>Украшения из меди с сульфидами</b>																	
31.	Бусина	Верхняя Алабуга	1, 33	27884	894	Осн.	0,015	0,005	—	—	0,0003	—	—	1,5	0,2	—	—
32.	Бусина	Верхняя Алабуга	1, 34	27885	895	Осн.	2,5	0,02	—	—	0,0002	—	0,006	1,5	0,05	—	—
<b>Слитки из сплавов Cu+Sn, Cu+Sn+As</b>																	
33.	Слиток	Кулевчи 3	1, 41	29417	371	Осн.	12,0	0,06	?	0,002	0,015	0,0025	0,08	0,05	0,005	<0,001	—
35.	Слиток	Кулевчи 3	1, 47	29375**	377	Осн.	2,5	0,35	0,005	0,008	0,02	0,007	1,5	1,5	0,025	<0,003	<0,001
36.	Слиток	Кулевчи 3	1, 40	32146	412	Осн.	14,0	0,25	0,004	0,007	0,006	0,0045	0,02	0,3	0,005	?	<0,001
37.	Слиток	Озерное 1	1, 53	49879***	1201	Осн.	0,02	0,27	0,23	0,06	0,03	0,17	1,88	0,13	0,01	—	—
<b>Орудия труда из сплавов Cu+Sn, Cu+Sn+As</b>																	
38.	Нож	Кулевчи 3	1, 17	29422	349	Осн.	10,0	0,1	—	0,001	0,0005	0,15	0,03	0,017	0,0015	<0,001	—
39.	Нож	Кривое Озеро	1, 20	006	418	Осн.	0,5	0,08	0,006	0,004	0,01	<0,01	0,06	0,45	0,01	0,001	0,0003
40.	Нож	Устье 1	1, 18	025	468	Осн.	0,4	0,01	0,1	0,005	0,01	0,02	0,1	0,2	0,001	0,0004	0,001
41.	Нож	Устье 1	1, 16	032	486	Осн.	0,45	0,03	0,008	0,008	0,05	0,01	0,06	0,04	0,005	<0,001	<0,001
42.	Нож	Верхняя Алабуга	1, 21	27871	892	Осн.	3,5	0,025	?	0,0002	0,0003	0,002	0,15	0,35	0,02	—	0,001
43.	Тесло	Кривое Озеро	1, 2	284	439	Осн.	1,4	0,18	0,18	0,004	0,03	0,07	0,2	0,17	0,08	<0,002	0,02
44.	Долото	Убаган 2	1, 3	369	944	Осн.	2,525	0,219	0,001	0,002	0,013	<0,05	0,021	1,06	0,00002	0,001	0,002
45.	Колье	Кривое Озеро	1, 27	38502	451	Осн.	0,77	0,0011	0,0012	0,0005	0,0017	—	0,014	0,017	0,0073	0,0014	—
46.	стрела	Убаган 1	1, 28	306	960	Осн.	0,420	0,015	0,258	0,002	0,008	<0,01	0,071	0,250	0,003	0,002	<0,001
47.	Шило	Устье 1	1, 24	38525	581	Осн.	3,6	0,0025	0,0009	0,0016	0,0082	0,0016	0,0046	0,27	0,0073	0,0017	—
48.	Шило	Убаган 2	1, 25	403	955	Осн.	0,740	0,072	0,049	0,008	0,041	0,170	<0,02	0,067	0,01	<0,001	<0,001
<b>Украшения из сплавов Cu+Sn, Cu+Sn+As, Sn+Pb</b>																	
49.	Браслет	Верхняя Алабуга	1, 29	27870	893	Осн.	4,0	0,09	0,01	0,008	0,0008	—	0,15	0,04	0,003	—	—
50.	Подвеска	Убаган 2	1, 31	404	958	Осн.	3,165	0,325	0,057	<0,001	0,011	<0,01	<0,01	0,241	<0,001	<0,005	<0,001
51.	Браслет	Верхняя Алабуга	1, 30	371	966	Осн.	2,160	0,066	0,010	0,005	0,019	<0,05	0,061	0,03	0,006	0,002	<0,001
52.	Подвеска	Верхняя Алабуга	1, 36	27864	969	Осн.	8	0,075	—	0,0005	0,0015	—	0,02	0,05	0,002	—	—
53.	Кольцо	Убаган 3	1, 35	49768	1058	Осн.	1,1	53,8	41,9	—	0,7	—	—	0,5	—	—	—
54.	Браслет	Озерное 1	1, 32	49873	1195	Осн.	5,82	0,17	—	0,06	0,05	0,04	0,18	0,15	—	—	—

\* Спектральный анализ с 5-значными номерами, РФА (49760–49879) — произведены в лаборатории ИА РАН, атомно-эмиссионный спектрометрический анализ с 3-значными номерами — в Институте неорганической химии СО РАН. Приведенные в таблице анализы предметов № 9, 15, 18, 32 не совпали с данными СЭМ.

**Результаты**

Металлические изделия, исследованные методом сканирующей электронной микроскопии, распределены на 4 группы: чистая медь с включениями эвтектики Cu–Cu<sub>2</sub>O (4 экз.); медь с ку-

притом и примесями сульфидов (2 экз.); медь с включениями сульфидов (26 экз.); сплавы Cu+Sn, Cu+Sn+As, Cu+Sn+Pb (22 экз.). Результаты картирования распределения элементов и определения элементного состава в образцах из **чистой окисленной меди** показали значительную чистоту  $\alpha$ -фазы меди, в которой прочие примеси не обнаружены, за исключением кислорода, примесей Fe и Pb в десятых долях масс. % (ан. 940, 1198, 370, 1140). В составе этих изделий сера не отмечена (табл. 2, 3; рис. 1, 1, 2, 4, 5). Для слитков характерна литая полиэдрическая структура с включениями эвтектики Cu-Cu<sub>2</sub>O с содержанием кислорода 0,1–0,2 %. При исследовании среза ножа обнаружены деформированные рекристаллизованные зерна с включениями закиси меди, равномерно распределенными по шлифу.



**Рис. 1.** Медные и бронзовые изделия петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Притоболья, проанализированные методом СЭМ:

1 — топор (ан. 345); 2 — тесло (ан.439); 3 — долото (ан. 944); 4–7 — серпы (ан. 457, 352, 454, 351); 8–14 — ножи с рукоятками (ан. 346, 460, 348, 480, 347, 354, 356); 15 — нож со втулкой (ан. 1140); 16–20 — черенковые ножи (ан. 486, 349, 468, 1193, 418, 892); 22 — обломок ножа (ан. 355); 23–26 — шилья (ан. 488, 581, 955, 466); 27, 28 — наконечники копья и стрелы (ан. 451, 960); 29, 30, 32 — браслеты (ан. 893, 966, 1195); 31, 36 — подвески (ан. 958, 969); 33, 34 — бусины (ан. 894, 895); 37, 38 — слитки (ан. 458, 458а, 467, 412, 371, 366, 374, 368, 369, 372, 377, 998); 50–54 — сплески (ан. 370, 1198, 962, 940, 1201, 941) (1, 5, 7, 8, 10, 12, 13, 17, 22, 40–47, 49 — пос. Кулевчи 3; 2, 20, 27 — мог. Кривое Озеро; 3, 25, 31, 51 — пос. Убаган 2; 4, 6, 9, 11, 16, 18, 23, 24, 26, 37–39 — пос. Устье 1; 14 — пос. Старокумлякское; 15 — пос. Нижнеингалское 1; 19, 32, 50, 53 — мог. Озерное 1; 21, 29, 30, 33, 34, 36 — мог. Верхняя Алабуга; 28 — мог. Убаган 1; 48 — пос. Камышное 1; 35, 52, 54 — пос. Убаган 3).

**Fig. 1.** Copper and bronze items of the Petrovka Culture of the Southern Trans-Urals and Middle Tobol region analyzed by SEM:

1 — axe (an. 345); 2 — adze (an. 439); 3 — chisel (an. 944); 4–7 — sickles (an. 457, 352, 454, 351); 8–14 — knives with handles (an. 346, 460, 348, 480, 347, 354, 356); 15 — knife with open socket (an. 1140); 16–20 — handled knives (an. 486, 349, 468, 1193, 418, 892); 22 — knife fragment (an. 355); 23–26 — awls (an. 488, 581, 955, 466); 27, 28 — spearheads and arrowheads (an. 451, 960); 29, 30, 32 — bracelets (an. 893, 966, 1195); 31, 36 — pendants (an. 958, 969); 33, 34 — beads (an. 894, 895); 37, 38 — ingots (an. 458, 458а, 467, 412, 371, 366, 374, 368, 369, 372, 377, 998); 50–54 — splashes (an. 370, 1198, 962, 940, 1201, 941).

**Характеристика включений и фазового состава сплавов по результатам сканирующей электронной микроскопии**

Table 3

Characteristics of inclusions and phase composition of alloys based on the results of scanning electron microscopy

№	Предмет	№ ан.	Памятник	№ рис.	Фазовый состав
<b>Изделия из меди с купритом</b>					
1.	Слиток	940	Пос. Убаган 3	1, 52; 2, 1	Эвтектика Cu-Cu <sub>2</sub> O (содержание O <sub>2</sub> 0,1–0,15 %), включения свинца
2.	Слиток	1198	Мог. Озерное 1	1, 50; 2, 2	Эвтектика Cu <sub>2</sub> O (содержание O <sub>2</sub> 0,1 %)
3.	Слиток	370	Пос. Кулевчи 3	1, 49; 2, 3	Медь с включениями Cu <sub>2</sub> O (0,05 %), мелкие Pb-фазы (Pb 0,2 %)
4.	Нож	1140	Пос. Нижнеингальское 1	1, 15; 2, 4, 5	Чистая медь с включениями Cu <sub>2</sub> O (содержание кислорода до 0,2 %)
<b>Изделия из меди с купритом и сульфидами</b>					
5.	Слиток	374	Пос. Кулевчи 3	1, 43	Медь с первичными кристаллами закисы меди Cu <sub>2</sub> O (0,5 %) и включениями халькозина размером менее 5 мкм
6.	Нож	355	Пос. Кулевчи 3	1, 22; 2, 3	Чистая медь с включениями Cu-Cu <sub>2</sub> O и сульфидов (S 0,1–0,2 %)
<b>Слитки из меди с сульфидами</b>					
7.	Слиток	366	Пос. Кулевчи 3	1, 42	Медь с включениями вюстита, сульфидов хрома (S 9,7 %; Cr 1,2 %)
8.	Слиток	368	Пос. Кулевчи 3	1, 44; 2, 8	Медь с включениями вюстита, халькозина (S 17,1 %), сульфидов хрома (S 11,7 %; Cr 1,3 %)
9.	Слиток	369	Пос. Кулевчи 3	1, 45	Медь с включениями вюстита, халькозина, хромсодержащих включений
10.	Слиток	372	Пос. Кулевчи 3	1, 46	Медь с включениями вюстита, сульфидов
11.	Слиток	458	Пос. Устье 1	1, 37	Медь с многочисленными включениями Se-Te халькозина. Размер зерен меди 20–40 мкм, халькозина до 5–7 мкм.
12.	Слиток	458а	Пос. Устье 1	1, 38	Медь с многочисленными включениями халькозина размером до 1–5 мкм с редкими включениями оксидов железа (магнетит, вюстит?) размером около 1 мкм
13.	Слиток	467	Пос. Устье 1	1, 39; 2, 6	Медь с включениями халькозина (S 2,6–13,8 %)
14.	Слиток	941	Пос. Убаган 3	1, 54	Медь с сульфидами
15.	Слиток	962	Пос. Убаган 2	1, 51	Медь с редкими включениями халькозина и сульфида свинца.
<b>Орудия труда из меди с сульфидами</b>					
16.	Топор	345	Пос. Кулевчи 3	1, 1	Медь с редкими включениями халькозина, Fe
17.	Нож	346	Пос. Кулевчи 3	1, 8	Медь с включениями халькозина
18.	Нож	347	Пос. Кулевчи 3	1, 12; 2, 7	Медь с редкими включениями оксидов железа
19.	Нож	348	Пос. Кулевчи 3	1, 10	Медь с редкими включениями оксидов железа (магнетит, вюстит)
20.	Нож	356	Пос. Старокумляжское	1, 14	Медь с редкими включениями халькозина и оксидов железа
21.	Нож	460	Пос. Устье 1	1, 9	Медь с включениями Fe (0,4 %), сульфидов, хрома
22.	Нож	480	Пос. Устье 1	1, 11	Чистая медь, мелкие включения сульфидов
23.	Нож	1193	Мог. Озерное 1	1, 19; 2, 10	Медь с включениями халькозина и оксидов Fe
24.	Серп	351	Пос. Кулевчи 3	1, 7	Медь с включениями халькозина (в виде глобул до 70 мкм в поперечнике, S до 15,7 %) и оксидов Fe (Fe до 1,2 %)
25.	Серп	352	Пос. Кулевчи 3	1, 5	Медь с включениями халькозина, Cr
26.	Серп	454	Пос. Устье 1	1, 6	Медь с примесью Fe (1–1,5 %) и включениями оксидов железа (магнетит, вюстит)
27.	Серп	457	Пос. Устье 1	1, 4; 2, 9	Медь с включениями халькозина, Cr
28.	Пила	354	Пос. Кулевчи 3	1, 13	Медь с включениями Fe (0,4 %), сульфидов, хрома
29.	Шило	466	Пос. Устье 1	1, 26	Медь с включениями Fe (до 0,7 %), халькозина
30.	Шило	488	Пос. Устье 1	1, 23	Медь с включениями оксидов Fe, халькозина, хрома
<b>Украшения из меди с включениями сульфидов</b>					
31.	Бусина	894	Мог. Верхняя Алабуга	1, 33	Медь с включениями оксидов Fe (2–3,8 %), S (0,7 %), Cr (0,6 %)
32.	Бусина	895	Мог. Верхняя Алабуга	1, 34	Медь с включениями оксидов Fe (1,9 %), S (1,2 %), Cr (0,4 %)
<b>Слитки из сплавов Cu+Sn, Cu+Sn+As</b>					
33.	Слиток	371	Пос. Кулевчи 3	1, 41; 3, 1	Cu+Sn (Sn ср. 8,3 %; 3,9–30,1 %), α+Cu <sub>3</sub> Sn <sub>8</sub> , α-фаза, включения Cr
34.	Слиток	998	Пос. Камышное 1	1, 46; 3, 4–6, 8	Cu+Sn (Sn ср. 11,9 %; 7,6–26,6 %), α-фаза, α+Cu <sub>3</sub> Sn <sub>8</sub> , включения системы Cu-Pb-Cr
35.	Слиток	377	Пос. Кулевчи 3	1, 47	Сплав Cu+Sn+As (Sn 9 %, As 7,5 %) с включениями сульфидов свинца размером до 5 мкм, железа до 1–1,5 % размером до 20–30 мкм
36.	Слиток	412	Пос. Кулевчи 3	1, 40; 3, 2	Cu+Sn (Sn ср. 9 %; 4,6–18,9 %), отжиг гомогенизации, оплавленные границы
37.	Слиток	1201	Мог. Озерное 1	1, 53	Сложный сплав Cu+As+Sb с включениями эвтектики α+Cu <sub>3</sub> As (концентрации As 0,6–22 %, Sb 0,2–3,8 %), сульфидов свинца, халькозина с примесями Se или Te
<b>Орудия труда из сплавов Cu+Sn, Cu+Sn+As</b>					
38.	Нож	349	Пос. Кулевчи 3	1, 17; 4, 2	Cu+Sn (Sn ср. 10 %; 0,2–43,4 %), α+Cu <sub>3</sub> Sn <sub>8</sub> , включения Cu <sub>2</sub> S, Cr
39.	Нож	418	Мог. Кривое Озеро	1, 20	Cu+Sn (Sn ср. 4,3 %; 2,5–6,4 %), включения сульфидов, Fe, Cr
40.	Нож	468	Пос. Устье 1	1, 18; 3, 11–13	Cu+Sn (Sn ср. 2–3 %), включения халькозина, Fe, Sn равномерно распределен после отжига
41.	Нож	486	Пос. Устье 1	1, 16	Cu+Sn (2–3 %), включения оксидов Fe, ликвация отсутствует, Sn равномерно распределен после отжига при 900 °C
42.	Нож	892	Мог. Верхняя Алабуга	1, 21; 3, 16, 17	Cu+Sn+As (Sn ср. 8,6 %; 1,4–27,5 %; As 1,2 %), включения Sn-As-Fe, Se-халькозин
43.	Тесло	439	Мог. Кривое Озеро	1, 2, 3, 9, 10	Cu+Sn (Sn ср. 2–3 %; 0,5–25,0 %), включения Fe, Cr, халькозина, фазы Pb-Bi
44.	Долото	944	Пос. Убаган 2	1, 3, 3, 18	Cu+Sn (Sn ср. 14–15 %; 2,6–35,4 %), включения халькозина, Cr, галенит
45.	Наконечник копья	451	Мог. Кривое Озеро	1, 27; 3, 3, 7	Cu+Sn (Sn ср. 1,4 %; 1,2–1,7 %), включения халькозина
46.	Наконечник стрелы	960	Мог. Убаган 1	1, 28	Cu+Sn бронза (Sn 0,7 %), включения халькозина+Cr, сплав гомогенизирован
47.	Шило	581	Пос. Устье 1	1, 24; 3, 14, 15	Cu+Sn (Sn ср. 3,7 %; 1,2–8,6 %), дендритное строение с ликвацией Sn, включения Fe (0,3–0,8 %), оксидов Fe, халькозина. Замещение меди оловом (Sn 39 %) в поверхностной прокоррозированной зоне
48.	Шило	955	Пос. Убаган 2	1, 25; 4, 1	Cu-Sn-As бронза (Sn 1,7 %; As 0,6 %), с включениями оксидов Fe, Pb
<b>Украшения из сплавов Cu+Sn, Cu+Sn+As, Sn+Pb</b>					
49.	Браслет	893	Мог. Верхняя Алабуга	1, 29; 4, 7, 8	Cu-Sn бронза (ср. Sn 12 %), с включениями халькозина, Cr, в поверхностной прокоррозированной зоне обнаружено замещение меди оксидами олова (Sn до 62,6 %)
50.	Подвеска	958	Пос. Убаган 2	1, 31; 4, 3–6	Cu-Sn бронза (ср. Sn 11 %), с включениями Se-халькозина. В поверхностной прокоррозированной зоне обнаружено замещение меди оксидами олова (Sn до 46,6 %)
51.	Браслет	966	Мог. Верхняя Алабуга	1, 30; 4, 9	Cu-Sn бронза (ср. Sn 7,4 %; 4,9–13 %), с включениями халькозина, Cr
52.	Подвеска	969	Мог. Верхняя Алабуга	1, 36; 4, 10	Cu-Sn бронза (ср. Sn 9,7 %), с включениями халькозина
53.	Кольцо	1058	Пос. Убаган 3	1, 35; 4, 11–15	Легкоплавкий сплав, представленный эвтектикой Sn-Pb-Cu, с включениями Cr
54.	Браслет	1195	Мог. Озерное 1	1, 32	Cu+Sn (8 %), включения халькозина, оксидов Fe

**Химический состав металла памятников петровской культуры Южного Зауралья по данным картирования растровых участков (мас. %) и точечных замеров ЭДА (мас. %)**

Table 4

Chemical composition of metal in the sites of the Petrovka Culture of the Southern Trans-Urals according to the data of mapping raster areas and point measurements of EDA (wt.%)

№	Предмет	Памятник	№ ан.	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Fe	Ni	S	Se	Bi	Cr		
<b>Изделия из чистой меди с купритом</b>																
1.	Слиток	Пос. Убаган 3	940-2К *	99,9	—	—	—	—	0,1	—	—	—	—	—		
			940-9-11	99,9	—	—	—	—	—	0,1	—	—	—	—	—	
			940-9-12	99,9	—	—	—	—	—	0,1	—	—	—	—	—	
2.	Слиток	Мог. Озерное 1	1198-5К	99,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
3.	Слиток	Пос. Кулевчи 3	370-12К	99,7	—	0,3	—	—	—	—	—	—	—	—		
4.	Нож	Пос. Нижнеингальское 1	1140-17К	99,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
<b>Изделия из чистой меди с купритом и сульфидами</b>																
5.	Слиток	Пос. Кулевчи 3	374-17К	99,5	—	—	—	—	—	—	0,7	—	—	—		
6.	Нож	Пос. Кулевчи 3	355-14К	99,9	—	—	—	—	—	—	0,1	—	—	—		
<b>Изделия из меди с сульфидами</b>																
<i>Слитки</i>																
7.	Слиток	Пос. Кулевчи 3	366-8-20	66,9	—	—	—	—	0,2	—	9,7	—	—	1,2		
8.	Слиток	Пос. Кулевчи 3	368-31-46	54,1	—	—	—	—	0,1	—	11,7	—	—	1,3		
			368-31-47	92,9	—	—	—	—	0,1	—	0,3	—	—	0,1		
			368-31-48	90,3	—	—	—	—	—	0,3	—	—	—	—	0,1	
			368-33-50	67,3	—	—	—	—	—	—	—	17,1	—	—	0,1	
			368-33-51	90,2	—	—	—	—	—	0,3	—	—	—	—	—	
9.	Слиток	Пос. Кулевчи 3	369-12-24	46,7	—	—	—	—	0,2	—	10,2	—	—	0,7		
			369-12-26	83,5	—	—	—	—	—	0,1	—	4,7	—	—	0,4	
			369-12-28	46,8	—	—	—	—	—	1,5	—	0,6	—	—	17,7	
10.	Слиток	Пос. Кулевчи 3	372-21К	81,7	—	—	—	—	0,3	—	0,8	—	—	—		
			372-25-27	8,7	—	—	—	—	83,2	—	—	—	—	—		
			372-25-28	13,3	—	—	—	—	—	75,2	—	—	—	—	—	
			372-25-29	81,1	—	—	—	—	—	4,5	—	7,6	—	—	—	
11.	Слиток	Пос. Устье 1	467-10К	94,8	—	—	—	—	—	—	2,6	—	—	—		
<b>Орудия труда</b>																
12.	Нож	Пос. Кулевчи 3	346-5К	79,9	—	—	—	—	0,1	—	0,2	—	—	—		
13.	Нож	Пос. Кулевчи 3	347-22К	98,1	—	—	—	—	0,2	—	0,1	—	—	—		
14.	Нож	Пос. Кулевчи 3	348-19К	87,8	—	—	—	—	0,7	—	0,3	—	—	0,2		
15.	Нож	Прс. Старокумлякское	356-11К	96,7	—	—	—	—	0,1	—	0,1	—	—	—		
16.	Нож	Пос. Устье 1	460-23К	94,7	—	—	—	—	0,2	—	0,7	—	—	0,1		
17.	Нож	Пос. Устье 1	480-37К	95,3	—	—	—	—	0,1	—	0,3	—	—	0,1		
18.	Серп	Пос. Кулевчи 3	352-36-52	58,2	—	—	—	—	—	—	9,9	—	—	0,6		
			352-36-53	58,5	—	—	—	—	—	—	12	—	—	0,8		
			352-36-54	68,3	—	—	—	—	—	—	0,3	—	—	—	0,1	
19.	Пила	Пос. Кулевчи 3	354-5-1	63,2	—	—	—	—	—	—	6,9	—	—	2,0		
			354-5-2	97,2	—	—	—	—	—	0,4	—	—	—	—		
			354-5-4	98,4	—	—	—	—	—	0,4	—	—	—	—		
20.	Серп	Пос. Устье 1	457-16-8	75,3	—	—	—	—	—	—	16,3	—	—	—		
			457-16-9	63,6	—	—	—	—	—	—	—	13,8	—	—	5,9	
21.	Нож	Мог. Озерное 1	1193-20К	97,7	—	—	—	—	0,2	—	0,2	—	—	0,1		
22.	Шило	Пос. Устье 1	466-19К	80,4	—	—	—	—	0,7	—	0,3	—	—	—		
23.	Шило	Пос. Устье 1	488-12К	67,3	—	—	—	—	0,1	—	0,6	—	—	0,1		
<b>Украшения</b>																
24.	Бусина	Мог. Верхняя Алабуга	894-30К	81,4	—	—	—	—	2,0	—	0,7	—	—	0,6		
			894-41К	88,2	—	—	—	—	—	3,8	—	0,6	—	—	0,2	
25.	Бусина	Мог. Верхняя Алабуга	895-35К	90,5	—	—	—	—	1,6	—	0,5	—	—	0,2		
			895-46К	93,1	—	—	—	—	—	1,9	—	1,2	—	—	0,4	
<b>Изделия из бронзы Cu+Sn, Cu+Sn+As</b>																
<i>Слитки</i>																
26.	Слиток	Пос. Кулевчи 3	371-10К	90,8	8,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2	
			371-13-12	64,6	30,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,8
			371-13-13	92,5	6,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			371-13-15	92,6	3,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,2
27.	Слиток	Пос. Кулевчи 3	412-28-41	59,0	18,9	1,1	—	—	0,6	—	0,4	—	—	—	0,4	
			412-28-42	81,0	9,7	—	—	—	—	0,2	—	—	—	—	—	
			412-28-43	80,6	10	—	—	—	—	0,2	—	—	—	—	—	0,1
			412-28-43	70,5	4,6	0,3	—	—	—	0,2	—	0,4	—	—	—	0,8
28.	Слиток	Пос. Камышное 1	998-15К	58,7	14,3	4,2	—	—	0,5	—	0,2	—	—	—	0,5	
			998-25-37	2,4	—	86,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5
			998-25-38	66,3	26,6	0,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,1
			998-25-39	86,9	7,0	—	—	—	—	0,1	—	—	—	—	—	—
<b>Орудия труда</b>																
29.	Нож	Пос. Кулевчи 3	349-7-5	67,7	0,2	1,3	—	—	—	—	10,5	—	—	—	0,5	
			349-7-6	67,2	0,1	—	—	—	—	—	—	10,8	—	—	—	0,4
			349-7-8	75,6	20,5	—	—	—	—	—	—	0,4	—	—	—	—
			349-7-9	46,2	43,4	—	—	—	—	—	—	1,3	—	—	—	—
30.	Нож	Мог. Кривое Озеро	418-24-36	61,5	2,8	—	—	—	0,4	—	11	—	—	—	0,9	
			418-24-38	63,2	6,4	—	—	—	—	0,8	—	1,1	—	—	—	0,2
			418-24-39	87,2	2,5	—	—	—	—	1,1	—	0,2	—	—	—	0,1
31.	Нож	Пос. Устье 1	468-5	92,5	2,3	—	—	—	0,3	—	2,1	—	—	—	—	
			468-8-5	80,7	0,3	—	—	—	—	—	—	13,7	—	—	—	
			468-8-6	95,6	3,0	—	—	—	—	0,3	—	—	—	—	—	—
			468-8-7	95,4	2,5	—	—	—	—	0,4	—	0,8	—	—	—	—



Цветной металл петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Приоболья...

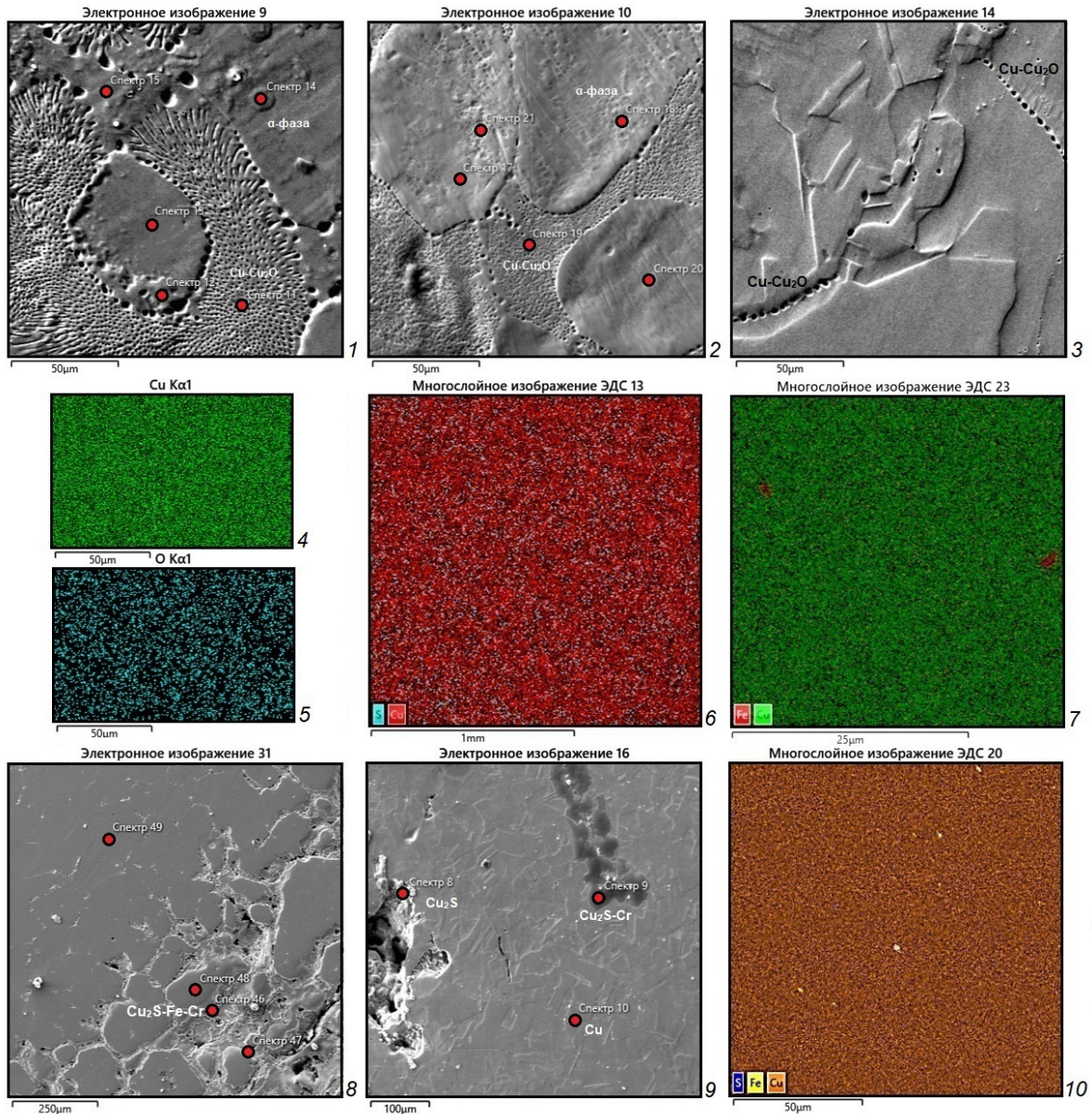
Окончание табл. 4

№	Предмет	Памятник	№ ан.	Cu	Sn	Pb	Sb	As	Fe	Ni	S	Se	Bi	Cr
32.	Нож	Пос. Устье 1	486-28	93,8	2,2	—	—	—	0,1	—	0,2	—	—	—
33.	Нож	Мог. Верхняя Алабуга	892-21K	82,0	8,6	—	—	0,7	0,5	—	0,2	—	—	—
			892-23-26	79,7	1,4	—	—	—	—	—	14,3	2,6	—	—
			892-23-28	52,2	27,5	—	—	2,8	1,4	—	0,7	—	—	—
			892-23-29	85,7	5,7	—	—	0,7	0,4	—	0,1	—	—	—
34.	Тесло	Мог. Кривое Озеро	439-5K	81,5	1,7	—	—	—	0,5	—	0,5	—	—	—
			439-3-3	52,9	25,0	—	—	1,4	2,0	—	0,8	—	—	0,2
			439-3-4	55,6	0,5	—	—	—	0,2	—	3,6	—	—	—
			439-3-5	42,7	3,3	26,1	—	—	0,2	—	—	—	11,1	—
			439-5-7	22,0	8,9	20,0	—	—	0,2	—	—	—	25,4	—
			944-4-5	63,1	2,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35.	Долото	Пос. Убаган 2	944-4-9	58,5	19,7	—	—	—	—	—	11,0	—	—	0,8
			944-4-10	35,8	35,4	1,1	—	—	—	—	0,2	—	—	1,4
			944-4-13	7,9	16,5	42,8	—	—	0,2	—	0,3	—	—	0,3
			451-5K	92,3	1,2	—	—	—	—	—	2,4	—	—	—
36.	Копье	Мог. Кривое Озеро	451-6K	93,4	1,5	—	—	—	—	1,0	—	—	—	
			451-8-6	87,1	1,7	—	—	—	—	—	8,3	—	—	—
			960-10K	92,6	1,3	—	—	—	—	—	0,5	—	—	0,2
37.	Стрела	Мог. Убаган 1	960-12-12	76,0	—	—	—	—	—	—	18,4	—	—	2,3
			960-12-13	88,2	0,7	—	—	—	—	—	4,1	—	—	0,1
			960-12-16	97,5	0,9	—	—	—	—	—	0,1	—	—	—
			581-7K	63,9	4,5	—	—	—	0,4	—	1,5	—	—	0,1
38.	Шило	Пос. Устье 1	581-9-10	79,0	8,6	—	—	—	0,2	—	0,1	—	—	—
			581-9-11	86,5	1,1	—	—	—	0,8	—	—	—	—	—
			581-9-13	14,7	39,0	—	—	—	2,6	—	1,3	—	—	0,6
			581-9-14	16,9	17,9	—	—	—	1,5	—	0,6	—	—	0,8
			955-1K	93,9	1,1	—	—	0,6	0,2	—	0,3	—	—	0,1
			955-5-2	32,8	—	—	—	—	52,2	—	0,3	—	—	—
39.	Шило	Пос. Убаган 2	955-5-3	67,1	4,2	—	—	1,0	0,2	—	—	—	—	—
			955-5-4	92,4	2,7	0,9	—	0,2	0,4	—	1,9	—	—	0,3
			<i>Украшения</i>											
			893-8-7	84,8	12,4	—	—	—	—	—	—	0,3	—	—
40.	Браслет	Мог. Верхняя Алабуга	893-8-8	23,6	62,6	—	—	—	—	—	1,5	—	—	1,2
			893-8-9	85,8	12,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			893-8-10	86,2	12,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			958-16-17	86,5	11,1	—	—	—	—	—	0,1	—	—	—
			958-16-18	79,7	8,4	2,5	—	—	0,5	—	6,0	1,1	—	—
41.	Подвеска	Пос. Убаган 2	958-16-19	32,7	46,6	—	—	—	0,2	—	0,4	—	—	—
			958-16-20	87,2	10,9	—	—	—	—	—	0,1	—	—	—
			966-18K	89,9	5,5	—	—	—	—	—	0,9	—	—	0,2
			966-21-11	93,3	4,9	—	—	—	—	—	0,2	—	—	—
42.	Браслет	Мог. Верхняя Алабуга	966-21-12	84,6	13,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
			966-21-13	92,2	6,1	—	—	—	—	—	0,3	—	—	—
			969-5K	88,9	8,5	—	—	—	—	—	0,2	—	—	—
			1058-10K	0,7	49,7	40,1	—	—	—	—	—	—	—	0,7
43.	Браслет	Мог. Верхняя Алабуга	1058-11K	0,5	54,6	35,5	—	—	—	—	—	—	—	—
			1058-12K	0,7	43	48,5	—	—	—	—	—	—	—	0,5
			1195-2K	85,3	8,0	—	—	—	0,2	—	—	—	—	—
44.	Кольцо	Пос. Убаган 3	1195-3K	86,5	8,0	—	—	—	0,3	—	0,1	—	—	—
			1195-4K	85,7	8,3	—	—	—	0,3	—	0,1	—	—	—
			969-5K	88,9	9,7	—	—	—	—	—	0,2	—	—	—

\* Номер с индексом К означает, что замеры даны по данным картирования растровых участков.

Два изделия — слиток и нож, отнесенные к **группе меди с купритом и примесями сульфидов**, содержали как включения эвтектики Cu–Cu<sub>2</sub>O, так и сульфиды (ан. 374, 355). При этом металл ножа практически был раскислен — содержание кислорода не превышало 0,05 %, включения эвтектики Cu–Cu<sub>2</sub>O незначительны и имели строчечное расположение на поверхности шлифа (ан. 355; рис. 2, 3). Слиток содержал включения халькозина размером 5 мкм (содержание S до 0,7 % по данным картирования) на фоне первичных дендритообразных кристаллов закиси меди (кислород — 0,5 %).

В составе 3 группы — **меди с включениями сульфидов**, которая является наиболее многочисленной (26 экз.), находятся слитки (9 экз.), орудия труда (15 экз. — топор, ножи, серпы, пила, шилья) и украшения (2 бусины). По данным спектрального и атомно-эмиссионного спектрометрического анализов концентрации примесей в составе слитков минимальны — в тысячных и сотых долях процента, за исключением нескольких экземпляров, которые содержат в составе примеси Sn, Pb, Zn в десятых долях процента, Fe — до 1,5–2,0 мас. % [Дегтярева, Кузьминых, 2022, табл. 1]. Изучение распределения элементов при картировании и точечных замерах позволили идентифицировать в изделиях включения вюстита или магнетита, халькозин-ковеллина, Se-Te-халькозина, галенита, борнита (рис. 2, 6–10; табл. 1, 3). На анализируемых точках образцов зафиксирована сера с концентрациями 0,1–17,1 % мас.



**Рис. 2.** Электронные изображения изделий из чистой меди с эвтектикой Cu-Cu<sub>2</sub>O (1–5) и из меди с сульфидными включениями (6–10):

1, 2, 6, 8 — слитки (ан. 940, 1198, 467, 368); 3–5, 7, 10 — ножи (ан. 355, 1140, 347, 1193); 9 — серп (ан. 457) (1 — пос. Убаган 3; 2, 10 — мог. Озерное 1; 3, 7, 8 — пос. Кулевчи 3; 4, 5 — пос. Нижнеингальское 1; 6, 9 — пос. Устье 1) (1–3 — электронные изображения получены с помощью детектора вторичных электронов; 4–7, 10 — многослойные изображения ЭДС; 8, 9 — с помощью детектора обратно отраженных электронов; красным цветом обозначены точки микроанализа).

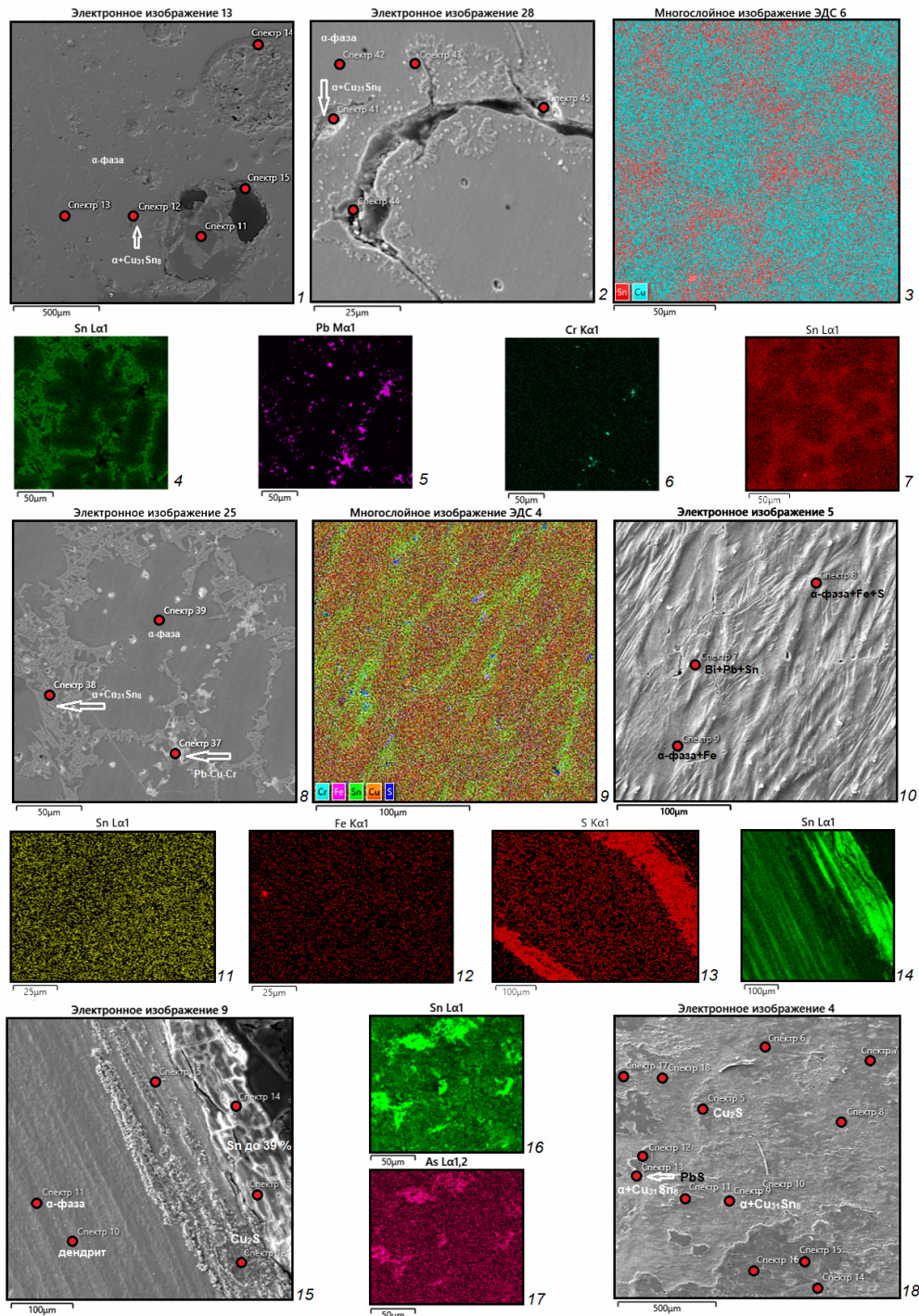
**Fig. 2.** Electronic images of products made of pure copper with Cu-Cu<sub>2</sub>O eutectic (1–5), and made of copper with sulfide inclusions (6–10):

1, 2, 6, 8 — ingots (an. 940, 1198, 467, 368); 3–5, 7, 10 — knives (an. 355, 1140, 347, 1193); 9 — sickle (an. 457) (1 — Ubagan 3; 2, 10 — Ozernoye 1; 3, 7, 8 — Kulevchi 3; 4, 5 — Nizhneingalskoye 1; 6, 9 — Ustye 1) (1–3 — electron images were obtained using a secondary electron detector; 4–7, 10 — multilayer EDS images; 8, 9 — using a backscattered electron detector; microanalysis points are marked in red).

В трех слитках и семи орудиях отмечены отдельные хромсодержащие фазы, четко различимые на многослойных снимках ЭДС, с концентрациями Cr по точечным замерам в диапазоне 0,1–17,7 % мас. При точечных замерах хром обнаружен в сочетании с Cu<sub>2</sub>S-Fe (рис. 2, 8; ан. 368-31-46; табл. 4) либо Cu<sub>2</sub>S-Cr (рис. 2, 9; ан. 457-16-9).



Цветной металл петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Притоболья...



**Рис. 3.** Электронные изображения изделий из сплава Cu+Sn:

1, 2, 4–6, 8 — слитки (ан. 371, 412, 998); 3, 7 — наконечник копья (ан. 451); 9, 10 — тесло (ан. 439); 11–13, 16, 17 — ножи (ан. 468, 892); 14, 15 — шило (ан. 581); 18 — долото (ан. 944) (1, 2 — пос. Кулевчи 3; 3, 7, 9, 10 — мог. Кривое Озеро; 4, 6, 8 — пос. Камышное 1; 11, 15 — пос. Устье 1; 16, 17 — мог. Верхняя Алабуга; 18 — пос. Убаган 2) (электронные изображения, полученные с помощью: 1, 18 — детектора вторичных электронов; 2, 8–10, 15 — детектора обратно отраженных электронов; 3–7, 11–14, 16, 17 — многослойные изображения ЭДС).

**Fig. 3.** Electronic images of products made of Cu+Sn alloy:

1, 2, 4–6, 8 — ingots (an. 371, 412–998); 3, 7 — spearhead (an. 451); 9, 10 — adze (an. 439); 11–13, 16–17 — knives (an. 468, 892); 14, 15 — awl (an. 581); 18 — chisel (an. 944) (1, 2 — Kulevchi 3; 3, 7, 9, 10 — Krivoje Ozero; 4, 6, 8 — Kamyshnoye 1; 11, 15 — Ustye 1; 16–17 — Verkhnyaya Alabuga; 18 — Ubagan 2) (electron images obtained using: 1, 18 — a secondary electron detector; 2, 8–10, 15 — a backscattered electron detector; 3–7, 11–14, 16, 17 — multilayer EDS images).

**Группа легированных бронз** включает 21 изделие из сплавов Cu+Sn (слитки — 3 экз.; орудия — 9 экз.; украшения — 5 экз.; всего 17 изделий), Cu+Sn+As (слиток — 1 экз.; орудия — 2 экз.; всего 3 изделия), Cu+As+Sb (слиток — 1 экз.), Sn+Pb+Cu (украшение — 1 экз.). Проанализированные слитки из **легированной Sn-бронзы** имеют по данным СЭМ в среднем достаточно высокое содержание олова — 8–12 % мас., при этом разброс в концентрациях при точечных замерах является существенным — от 3,9 до 30,1 % (ан. 371, 998, 412; рис. 3, 1, 2, 4–6, 8). На поверхности шлифов зафиксированы включения эвтектоида  $\alpha$ +Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub> с повышенными концентрациями олова до 30 %. Слиток из слоя пос. Кулевчи 4 подвергнут отжигу гомогенизации при 800–900 °С, что привело к появлению полиэдров с оплавленными широкими границами (ан. 412, рис. 3, 2). В двух случаях отмечены включения хрома с содержанием Cr 0,1–1,8 %, при этом на одном (ан. 998) — включения системы Pb-Cu-Cr (рис. 3, 4–6).

Орудия труда — ножи, тесло, шило в основном изготовлены из низколегированной Sn-бронзы в пределах 2–8 %, поэтому выраженная ликвация отсутствует и на картах распространения элементов распределение Sn, Fe, S выглядит равномерным (ан. 418, 468, 486, 439, 581; рис. 3, 10–15). На шлифах обнаружены включения халькозина, оксидов железа, хрома. Выраженное дендритное строение характерно для поверхности тесла (ан. 439; рис. 3, 9, 10). Содержание Sn в  $\alpha$ -фазе находится в пределах 0,3–3 %, в то время как на темных дендритных участках — до 9–25 %. При точечных замерах на шлифе обнаружены включения системы Sn-Pb-Bi (Sn 3–9%; Pb 20–26 %; Bi 11–25 %) в наиболее легкоплавких зонах, затвердевающих в последнюю очередь. На поверхности шила, подвергнутого коррозии, обнаружено значительное количество халькозина, а также выявлена зона замещения меди соединением SnO<sub>2</sub> при содержании олова 39 % (ан. 581; рис. 3, 14, 15). Два орудия — нож и долото изготовлены из среднелегированной оловом бронзы (10–15 %). На поверхности изделий обнаружены включения эвтектоида  $\alpha$ +Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub>, концентрации олова в которых находятся в пределах 20–43 % (ан. 349) и 16–35 % (ан. 944), включения халькозина и хрома (ан. 349, 944; рис. 3, 18; 4, 2). При точечных замерах в металле долота обнаружены включения галенита PbS с содержанием Pb 42,8 % (ан. 944; рис. 3, 18).

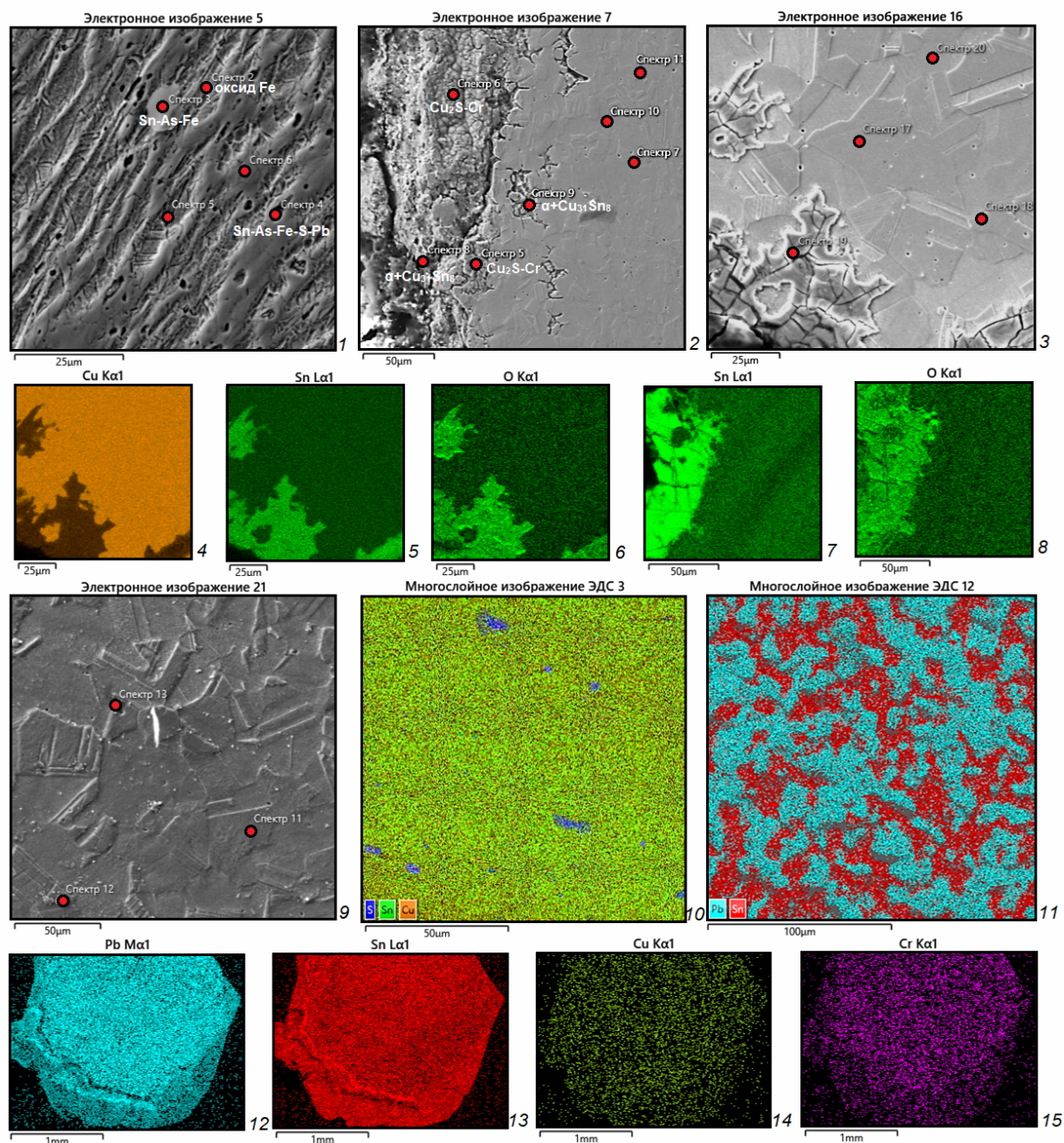
Среди аналитически исследованных изделий два предмета вооружения — наконечники копья (ан. 451) и стрелы (ан. 960). У обоих низкие концентрации олова в составе — 1,4 % и 0,7 % соответственно. Наконечник копья в районе втулки имеет литую структуру с дендритной ликвацией с несколько большим содержанием олова в дендритах красного цвета до 1,7 %, а также включения халькозина (рис. 3, 3, 7). Металл наконечника стрелы в процессековки подвергнут термообработке при 800–900 °С, в результате чего сплав гомогенизирован с образованием равновесного состояния. В металле стрелы обнаружены халькозин и хром.

Исследованные аналитически украшения — браслеты (ан. 893, 966, 1195) и височные подвески (958, 969) изготовлены ковкой из среднелегированной Sn-бронзы с примесью олова 7,4–12 %. Ковка сопровождалась длительными высокотемпературными отжигами при 600–800 °С, что привело к выравниванию сплавов, рассасыванию включений эвтектоида  $\alpha$ +Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub> и равновесному состоянию систем с небольшим разбросом значений Sn (табл. 4; рис. 4, 3–10). В металле украшений обнаружены включения Se-халькозина (ан. 958), халькозина и хрома (ан. 893, 966, 969), халькозина и оксидов Fe (ан. 1195). На шлифах браслета и височной подвески проанализированы ЭДС участки коррозии, замеры которых показали замещение меди SnO<sub>2</sub> с высоким содержанием олова 46,6–62 % в присутствии кислорода (ан. 893, 558; рис. 4, 4–8).

Еще одно украшение — уникальное по составу колечко, вернее, полуколечко, поскольку было разрушено, диаметром 0,9 см, по данным РФА и металлографического анализа изготовлено литьем из легкоплавкого **сплава Sn+Pb+Cu** (53,8; 41,9; 1,1 % соответственно) в присутствии Bi и Fe в десятых долях % (ан. 1058, пос. Убаган 3). На боковых поверхностях снаружи и изнутри выявлены четкие следы литейных швов. Местами отмечены и поперечные риски — следы рубки прутков на отдельные фрагменты. Обнаруженная при исследовании СЭМ эвтектика  $\alpha$ + $\beta$  имеет широкую область несмешивания как в жидком, так и в твердом состоянии [Дриц и др., 1979, с. 189]. Эвтектика Sn-Pb-Cu, образованная в достаточно узком температурном интервале 210–183 °С, располагается в виде глобулей (рис. 4, 11–15) [Гуляев, 1977, с. 623–627]. При этом свинец, кристаллизующийся в первую очередь, ингибирует осаждение олова и отсекает участки от растущих дендритов [Картонова, Кечин, 2014, с. 110–111]. Точечными замерами ЭДС содержание Sn определено в пределах 43–54,6 %, Pb — 35,5–48,5 %, Cu — 0,5–0,7 %, Cr — 0,5–0,7 % (рис. 4, 12–15). В среднем концентрации Sn достигают 49,1 %, Pb — 40,7 %.



## Цветной металл петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Притоболья...



**Рис. 4.** Электронные изображения изделий из сплавов Cu+Sn+As (1), Cu+Sn (2–10), Sn+Pb+Cu (11–15): 1 — шило (ан. 955); 2 — нож (ан. 349); 3–6, 10 — подвески (ан. 958, 969); 7–9 — браслеты (ан. 893, 966); 11–15 — кольцо (ан. 1058) (1, 3–6 — пос. Убаган 2; 2 — пос. Кулевчи 3; 7–10 — мог. Верхняя Алабуга; 11–15 — пос. Убаган 3) (электронные изображения, полученные с помощью: 1, 3, 9 — детектора обратно отраженных электронов; 2 — детектора вторичных электронов; 4–8, 10–15 — многослойные изображения ЭДС).

**Fig. 4.** Electronic images of products made of Cu+Sn+As (1), Cu+Sn (2–10), Sn+Pb+Cu (11–15) alloys: 1 — awl (an. 955); 2 — knife (an. 349); 3–6, 10 — pendants (an. 958, 969); 7–9 — bracelets (an. 893, 966); 11–15 — ring (an. 1058) (1, 3–6 — Ubagan 2; 2 — Verkhnyaya Alabuga; 11–15 — Ubagan 3) (electron images obtained using: 1, 3, 9 — a backscattered electron detector; 2 — a secondary electron detector; 4–8, 10–15 — multilayer EDS images).

Из **оловянно-мышьяковой бронзы** изготовлено 3 изделия — слиток, нож и шило (ан. 377, 892, 955). Содержание Sn в металле находилось в пределах 1,7–9 %, As — 0,6–7,5 %. При этом наибольший разброс в значениях Sn (1,4–27,5 %, среднее 8,6 %) зафиксирован для ножа, для которого характерна дендритная ликвация с неравномерным распределением олова (ан. 892). Судя по картированию элементного состава в металле наблюдаются включения системы Sn-As-Fe, а также Se-халькозина (рис. 3, 16, 17). В металле шила с выраженной дендритной ликва-

цией отмечены крупные включения системы Sn-As-Fe, галенит, оксиды железа (Sn 1,7 %; ан. 955). На поверхности шлифа слитка в междендритном пространстве обнаружены участки эвтектики  $\alpha$ -Cu<sub>3</sub>As, а также твердый раствор Sn в Cu<sub>3</sub>As синего цвета с дифференцированным строением (ан. 377) [Дриц и др., 1979, с. 178]. В зоне с эвтектикой  $\alpha$ -Cu<sub>3</sub>As и Sn-Cu<sub>3</sub>As содержание Sn, As повышено до 23,9 и 19,4 мас. % соответственно. В этих же точках концентрации Pb увеличены до 2,4 мас. %, Fe — 1,7 мас. %, а также отмечено присутствие Ni, S в десятых долях мас. % [Дегтярева и др., 2022; табл. 4, рис. 5, 11, 12]. По усредненным данным содержание Sn в слитке достигает 9,0 мас. %, As — 7,5 мас. %. При картировании участков с определением топологии элементов выявлено, что расположение Sn, As и Fe практически совпадает, что свидетельствует об использовании в составе шихты медных руд, обогащенных мышьяковистыми минералами.

Один слиток изготовлен из сложного сплава Cu+As+Sb (ан. 1201). Относительно чистый состав меди зафиксирован в области  $\alpha$ -фазы с содержанием As и S в десятых долях % [Дегтярева и др., 2022, рис. 6, 1, 2]. Замеры на включениях голубого цвета показали наличие включений Se-Te-халькозина с содержанием S 15,5–16,9 мас. % и концентраций Se, Te, Pb в десятых долях и целых % (рис. 6, 9). При картировании участков выявлено совпадение топологии S и Pb в зоне отдельных включений, расположенных как в  $\alpha$ -фазе, так и в зоне эвтектики. В сетчатых участках с зоной голубого цвета, обогащенной As и незначительным количеством эвтектики  $\alpha$ -Cu<sub>3</sub>As (As 0,6–22,0 мас. %), обнаружены также Sb (0,2–3,8 мас. %), Sn (в десятых долях %) [Хансен, Андерко, 1962, с. 179–180]. Содержание As в составе слитка по усредненным данным составляет 4,0 мас. %, Sb — 3,8 %.

### Обсуждение

Излагая результаты аналитического исследования, необходимо иметь в виду, что часть цветного инвентаря была вторичной, т.е. при необходимости по мере поломки изделия подлежали переплавке, иногда совместно с другими предметами разных сырьевых источников. Данное обстоятельство не позволяет всегда однозначно приходиться к определенным выводам. Вместе с тем при переработке лома включения в значительной степени с большой долей вероятности наследуются от исходного материала. В результате изучения топологии распределения элементного состава цветного металла петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Притоболья, точечных замеров поверхности металла с использованием методов СЭМ-ЭДА выделены в группе чистой меди 3 подгруппы: изделия из меди с купритом, металл из меди с купритом и сульфидами, из меди с сульфидами. Численно преобладающей является подгруппа изделий из меди с сульфидами — 26 экз., в то время как в 1 и 2 подгруппах всего 4 слитка и 2 ножа. Медь с купритом отличается очень чистым металлом — практически без примесей, за исключением мелких Pb-фаз в присутствии сетчатых участков эвтектики Cu-Cu<sub>2</sub>O, имеющих рубиновый цвет в поляризованном свете при полном отсутствии в составе серы (4 экз.). В металле второй подгруппы — меди с купритом и сульфидами зафиксированы примеси халькозина размером менее 5 мкм, содержание кислорода незначительно (до 0,03 %; 2 экз.). Эвтектика Cu-Cu<sub>2</sub>O обнаружена в виде тонкой оторочки вокруг литых полиэдров, металл достаточно раскислен. В металле 3 подгруппы отсутствует куприт, однако жидкий расплав неполностью ошлакован, поскольку есть примеси в виде сульфидов свинца, железа, хромсодержащих включений, халькозин-ковеллина, Se-Te-халькозина, галенита, борнита. Содержание оксидов железа (вюстит, магнетит) может быть связано с частичным восстановлением гетита, который содержится в рудах. Включения свинца, по наблюдениям И.А. Блинова, изучившего руды пос. Устье 1, часто ассоциируются с малахитом и азурином [Блинов, Виноградов, 2021].

Хромсодержащие включения в сочетании с Cu<sub>2</sub>S-Fe скорее всего перешли в твердый раствор из шлака. По диаграммам состояния двойных медных сплавов хром в меди имеет максимальную растворимость 0,7 мас. % при T 1074,8 °C, при охлаждении сплава ниже 400 °C растворимость хрома в меди понижается до 0,03–0,05 мас. %. Затем хром переходит в эвтектическое состояние Cu-Cr, содержится в виде отдельных включений, при нагревании легко взаимодействует с серой с образованием сульфида хрома Cr<sub>2</sub>S<sub>3</sub> [Дриц и др., 1979, с. 63].

Для выплавки чистой меди, в том числе меди с купритом, использовали руды из верхней части зоны окисления — малахит, азурит, тенорит. Однако в результате проведенного анализа выяснилось, что доля металла из меди с купритом была не так велика, как ранее представлялось. В эту группу входили единичные экземпляры слитков, несколько орудий. Основная масса

изделий имела примеси сульфидов. В этот период наблюдалась заметная трансформация в технологии плавки руд — металлурги петровской культуры Южного Зауралья перешли к использованию ковеллин-халькозиновых руд с борнитом, галенитом, возможно, и пород из зон окисления колчеданных залежей, о чем свидетельствует и анализ обломков руд, обнаруженных в слое пос. Устье 1, шлаков пос. Семиозерное 2 [Блинов, Виноградов, 2021; Блинов, Ломан, 2024]. Использование сульфидов при плавке наряду с раскислением металла способствовало повышению жидкотекучести и уменьшению вязкости жидкой меди [Богданов и др., 2023].

подавляющее большинство металлических изделий поселений Устье 1 и Кулевчи 3 относится к группе меди с сульфидсодержащими примесями с появлением структуры в литом состоянии в виде полиэдрических кристаллов с выраженной ликвацией по границам зерен (табл. 1). Слитки и орудия из оловянной бронзы на этих памятниках встречаются гораздо реже, чем на поселениях и могильниках Северного Притоболья. К ним относятся слитки и ножи из оловянной бронзы с содержанием олова 2–10 %. Притобольский металл, содержащий, помимо слитков и орудий труда, украшения, содержал значительно большее количество предметов из Sn-бронз (концентрации олова до 15 %), несколько изделий из сплавов Cu-Sn-As, Cu-As-Sb. Источниками оловянных бронз, вероятно, являлись месторождения Северного и Центрального Казахстана, где руды представлены как чистым касситеритом, так и ассоциацией с сульфидами (халькопирит, пирит, арсениопирит, галенит) [Artemyev, Ankushev, 2019; Артемьев и др., 2024]. По мнению Д.А. Артемьева, вполне реально проследить уральские источники сырья для выплавки меди при использовании касситерита по выраженной корреляции As-Co-Ni±(Sb-Fe-Au). Однако подобное осуществимо при условии массового проведения масс-спектрометрического анализа с индуктивной связанной плазмой и лазерным пробоотбором. Представленная выборка металлических изделий исследована методами спектрального и рентгенофлуоресцентного анализов с недостаточным порогом обнаружения для ряда элементов, поэтому эти определения возможны только в будущем. Судя по примесным элементам, для плавки металла Cu-As-Sb применялись блеклые руды. Особенности состава и топологии элементов свидетельствуют об использовании в составе шихты медных руд, обогащенных мышьяковистыми минералами (например, арсенатами и арсенидами) совместно с оловосодержащими рудами.

Примечательно обнаружение в слое пос. Убаган 3 колечка из сплава Sn-Pb-Cu. В коллекции петровского металла Южного Урала изделия из подобного сплава неизвестны, однако подобные украшения как по форме, так и по составу — из сплавов Pb-Cu и Pb-Sn-Cu обнаружены в елунинской культуре Алтая пос. Березовая Лука конца III — начала II тыс. до н.э. [Дегтярева и др., 2010; рис. 1, 9, 10]. Аналогии этим предметам имеются в памятниках культур эпохи бронзы Верхнего Приобья и Монголии (могильники Тузовские Бугры 1, Ягшийн-Ходоо 1, 3, Улан-Худак II [Абдулганеев, Кирюшин, 2002, с. 6; Ковалев, 2005, с. 182; Тишкин и др., 2008]. Елунинский металл представлен оловянной бронзой, медно-свинцовыми сплавами, наряду с широким использованием чистой меди и свинца для производства определенных категорий изделий. На поздних стадиях существования хронология елунинской культуры (XXII–XIX/XVIII вв. до н.э.) совпадает с датировкой петровской культуры Южного Зауралья [Грушин и др., 2016, с. 240].

При характеристике фазовых составляющих и легирующих компонентов в бронзах выявлен значительный разброс в концентрациях Sn и As, иногда разница бывает 10–15-кратной (ан. 439, 944). Такое колебание в содержании олова в металле объяснимо с точки зрения условий кристаллизации оловянных бронз, протекающей в значительном температурном интервале затвердевания между линиями ликвидус и солидус, формирования различных фазовых составляющих по мере охлаждения расплава в интервале 1100–350 °С [Лившиц, 1990]. Вначале происходит кристаллизация меди в виде светлых дендритов, далее — меди с растворенным оловом (до 7–8 % Sn) в виде темных участков, затем происходят фазовые превращения, в междендритных пространствах формируется легкоплавкий эвтектоид  $\alpha$ +Cu<sub>31</sub>Sn<sub>8</sub>. Последний имеет дифференцированное строение с разноокрашенными участками от синего до практически черного цвета, которые при этом имеют и разные концентрации олова в составе вплоть до 60 %. Поскольку посредством РФА, ЛА-ИСП-МС, микрозондового метода замеры концентраций производятся точно, то в зависимости от попадания в разные фазы приборы показывают разное содержание олова в предмете, и это объективно. Обычно для получения усредненных показателей легирующего компонента делают 4–6 замеров и высчитывают среднее содержание элемента в составе.

## Выводы

Присутствие в составе инвентаря петровской (раннеалакульской) культуры Южного Зауралья подавляющего большинства предметов, отлитых из меди с сульфидсодержащими примесями, позволяет сделать вывод, что в этот период использовали смешанные полуокисленные сульфидсодержащие руды с доминированием окисленной составляющей. В составе шихты были халькозин, ковеллин, возможно, и другие сульфиды, блеклые руды, борнит, галенит, возможно, и породы из зон окисления колчеданных залежей, но преобладали окисленные минералы — главным образом малахит и азурит, возможно, брошантит. Подобные инновационные сдвиги в технологии горного дела привели к значительному усовершенствованию литья и приемов обработки металла. При выплавке металла в составе шихты использовались медные руды, обогащенные мышьяковистыми минералами, — арсенаты и арсениды совместно с оловосодержащими рудами. Источниками оловянных бронз являлись месторождения Северного и Центрального Казахстана, где руды представлены как чистым касситеритом, так и полиметаллическими ассоциациями с сульфидами.

Обмен слитками и готовыми изделиями из сплавов Cu+Sn, Cu+Sn+As достаточно интенсивно развивался в широтном, в основном западном, направлении. Предметы импорта из восточных очагов в петровской среде Южного Зауралья были нередки — в частности, совершенный по форме и исполнению наконечник копья, а также тесло (мог. Кривое Озеро) могли быть завезены из Северного или Центрального Казахстана. В этом же ряду и колечко из оловянно-свинцового сплава. Изучение фазового состава бронз посредством СЭМ-ЭДА позволило объяснить причины широкого разброса концентраций лигатуры при замерах РФА существованием неравновесного состояния твердых растворов, обогащенных оловом или мышьяком в различной степени по мере кристаллизации расплава в широком температурном интервале.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-18-00146, «Цветная металлургия и металлообработка Северо-Западной Азии в первой половине II тыс. до н.э. (сырье, технологии, продукция, торговля и связи)», <https://rscf.ru/project/23-18-00146/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Абдулганеев М.Т., Кирюшин Ю.Ф.* Погребение раннего бронзового века из могильника Тузовские Бугры I // Северная Евразия в эпоху бронзы: Пространство, время, культура. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2002. С. 4–6.

*Артемьев Д.А., Дегтярева А.Д., Кузьминых С.В., Орловская Л.Б., Алаева И.П., Виноградов Н.Б.* Химизм оловянных бронз и возможные источники олова Урала и Казахстана в позднем бронзовом веке // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2024. 4. С. 19–35. <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2024-67-4-2>

*Блинов И.А., Виноградов Н.Б.* Минеральный состав руд, использовавшихся на укрепленном поселении бронзового века Устье-I (Южное Зауралье) // Теория и практика археологических исследований. 2021. 4 (33). С. 166–184. [https://doi.org/10.14258/tpai\(2021\)33\(4\).-10](https://doi.org/10.14258/tpai(2021)33(4).-10)

*Блинов И.А., Ломан В.Г.* Минеральный состав шлаков поселения Семиозерное 2 по данным растровой электронной микроскопии // Геоархеология и археологическая минералогия-2024. Миасс-Челябинск: Издательство ЮУрГГПУ, 2024. Т. 11. С. 134–139.

*Богданов С.В., Булатов В.А., Корочкова О.Н., Спиридонов И.А., Ткачев В.В.* Депонирование элементов исходных руд и лигатур в металле бронзового века Зауралья // Вестник Санкт-Петербургского университета. История. 2023. Т. 68. № 4. С. 1104–1140.

*Грушин С.П., Кирюшин Ю.Ф., Тишкин А.А., Горбунов В.В., Казаков А.А., Дядьков П.Г., Позднякова О.А., Солодовников К.Н., Тур С.С.* и др. Елунинский археологический комплекс Телеутский Взвоз-I в Верхнем Приобье: Опыт междисциплинарного изучения. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2016. 270 с.

*Гуляев А.П.* Металловедение. М.: Металлургия, 1977. 647 с.

*Дегтярева А.Д., Грушин С.П., Шайхутдинов В.М.* Металлообработка населения елунинской культуры Верхней Оби (предварительные результаты металлографического исследования) // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2010. № 2. С. 27–35.

*Дегтярева А.Д., Кузьминых С.В.* Металлические орудия труда петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Приобья: Химико-металлургическая характеристика // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2022. № 4. С. 28–41. <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2022-59-4-3>

*Дегтярева А.Д., Губин А.А., Артемьев Д.А.* Возможности использования сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионным анализатором в изучении металла эпохи бронзы: к постановке проблемы // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2022. № 1. С. 31–48. <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2022-56-1-3>



## Цветной металл петровской культуры Южного Зауралья и Среднего Приоболья...

Дриц М.Е., Бочвар Н.Р., Гузей Л.С., Лысова Е.В., Падежнова Е.М., Рохлин Л.Л., Туркина Н.И. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. М.: Наука, 1979. 248 с.

Картонова Л.В., Кечин В.А. Основы материаловедения металлических и неметаллических веществ. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. 176 с.

Ковалев А.А. Чемурчекский культурный феномен: его происхождение и роль в формировании культур эпохи ранней бронзы Алтая и Центральной Азии // Западная и Южная Сибирь в древности. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та. 2005. С. 178–184.

Лившиц Б.Г. Металлография. М.: Металлургия, 1990. 336 с.

Новиков И.И., Захаров М.В. Термическая обработка металлов и сплавов. М.: Металлургиздат, 1962. 429 с.

Тишкин А.А., Грушин С.П., Мунхбаяр Ч. Археологическое изучение объектов эпохи бронзы в урочище Улаан худаг (Ховдский аймак Монголии) // Теория и практика археологических исследований. 2008. Вып. 4. С. 85–92.

Равич И.Г. Эталоны микроструктур оловянной бронзы // Художественное наследие. М.: Искусство, 1983. Вып. 8 (38). С. 136–143.

Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М.: Изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1962. 608 с.

Artemyev D.N., Ankushev M.N. Trace Elements of Cu-(Fe)-Sulfide Inclusions in Bronze Age Copper Slags from South Urals and Kazakhstan: Ore Sources and Alloying Additions // Minerals. 2019. 9 (12). 746. <https://doi.org/10.3390/min9120746/>

Degtyareva A.D.<sup>a,\*</sup>, Gubin A.A.<sup>b</sup>, Blinov I.A.<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch RAS

Cherვისhevsky trakt st., 13, Tyumen, 625008, Russian Federation

<sup>b</sup> Tyumen State University, Volodarskogo st., 6, Tyumen, 625003, Russian Federation

<sup>c</sup> South Ural Federal Scientific Center of Mining and Geophysics of Ural Branch RAS

Ilmenny Reserve, Miass, 456317, Russian Federation

E-mail: adegtyareva126@gmail.com (Degtyareva A.D.); a.a.gubin@utmn.ru (Gubin A.A.);

ivan\_a\_blinov@mail.ru (Blinov I.A.)

### Non-ferrous metal of the Petrovka Culture of the Southern Trans-Urals and Middle Tobol region according to scanning electron microscopy data

The article presents the results of analytical study of copper and bronze items of the 19<sup>th</sup>–18<sup>th</sup> c. BC Petrovka Culture based on scanning electron microscopy. The sample includes tools, ingots, weapons, and ornaments originating from the materials of settlements and burial grounds in the Southern Trans-Urals and Middle Tobol region (54 items). During the work, the surface of the products was visualized with a study of topology of distribution of the elemental composition and structure of the metal in secondary (SE) and back-scattered (BSE) electrons to identify the phase composition of the samples. The obtained results suggest that this period saw the beginning of the widespread development of covellite-chalcocite and fahlores with bornite, galena, and possibly rocks from the oxidation zones of pyrite deposits, along with the use of minerals from the upper part of the oxidation zone — malachite, azurite, and tenorite. Such innovative advances in mining technology resulted in significant improvements in casting and metal processing techniques. Copper ores enriched with arsenic minerals — arsenates and arsenides — were used in the charge when smelting metal, together with tin-containing ores. The sources of tin bronzes were deposits in Northern and Central Kazakhstan, where the ores are represented by both pure cassiterite and polymetallic associations with sulfides. The exchange of ingots and finished products made of Cu+Sn and Cu+Sn+As alloys developed rather intensively in the latitudinal, mainly western, direction.

**Keywords:** Southern Trans-Urals, Petrovka Culture, Bronze Age, scanning electron microscopy, ancient metallurgy, types of raw material sources.

**Funding.** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-18-00146, «Non-ferrous metallurgy and metalworking in Northwest Asia in the first half of the 2nd millennium BC (raw materials, technologies, products, trade and communications)», <https://rscf.ru/en/project/23-18-00146/>.

## REFERENCES

Abdulganeev, M.T., Kiryushin, Yu.F. (2002). Early Bronze Age burial from the Tuzovskiye Bugry I burial ground. In: *Severnaya Yevraziya v epokhu bronzy: Prostranstvo, vremya, kul'tura*. Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 4–6. (Rus.).

Artemyev, D.A., Degtyareva, A.D., Kuzminykh, S.V., Orlovskaya, L.B., Alaeva, I.P., Vinogradov, N.B. (2024). Chemistry of tin bronzes and possible sources of tin in the Urals and Kazakhstan in the Late Bronze Age. *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, (4), 19–35. (Rus.). <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2024-67-4-2/>

---

\* Corresponding author.

Artemyev D.N., Ankushev M.N. (2019). Trace Elements of Cu-(Fe)-Sulfide Inclusions in Bronze Age Copper Slags from South Urals and Kazakhstan: Ore Sources and Alloying Additions. *Minerals*. 12(9). 746. <https://doi.org/10.3390/min9120746/>

Blinov, I.A., Vinogradov, N.B. (2021). Mineral composition of ores used at the Ustye-I fortified Bronze Age settlement (Southern Trans-Urals). *Teoriya i praktika arkheologicheskikh issledovaniy*, 33(4), 166–184. (Рус.). [https://doi.org/10.14258/tpai\(2021\)33\(4\).-10](https://doi.org/10.14258/tpai(2021)33(4).-10)

Blinov I.A., Loman, V.G. (2024) Mineral composition of slags from the Semiozerno 2 settlement according to scanning electron microscopy data. *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya 2024. T. 11*. Miass; Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGGPU, 134–139. (Рус.).

Bogdanov, S.V., Bulatov, V.A., Korochkova, O.N., Spiridonov, I.A., Tkachev, V.V. (2023). Deposit of elements of initial ores and ligatures in the metal of the Bronze Age of the Trans-Urals. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Istoriya*, 68(4), 1104–1140. (Рус.). <https://doi.org/10.21638/spbu02.2023.415>

Grushin, S.P., Kiryushin, Yu.F., Tishkin, A.A., Gorbunov, V.V., Kazakov, A.A., Dyadkov, P.G., Pozdnyakova, O.A., Solodovnikov, K.N., Tur, S.S., et al. (2016). *Eluninsky archaeological complex Teleutsky Vzvoz-I in the Upper Priobye: experience of interdisciplinary study*. Barnaul: Izd-vo Alt. universiteta. (Рус.).

Gulyaev, A.P. (1977). *Metallurgy*. M.: Metallurgiya. (Рус.).

Degtyareva, A.D., Grushin, S.P., Shaikhutdinov, V.M. (2010). Metalworking of the population of the Eluninskaya culture of the Upper Ob (preliminary results of metallographic research). *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, (2), 27–35. (Рус.).

Degtyareva, A.D., Kuzminykh, S.V. (2022). Metal tools of the Petrovka Culture of the Southern Trans-Urals and Middle Tobol region: Chemical and metallurgical characteristics. *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, (4), 28–41. (Рус.). <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2022-59-4-3>

Degtyareva, A.D., Gubin, A.A., Artemyev, D.A. (2022). Possibilities of using scanning electron microscopy with an energy-dispersive analyzer in the study of Bronze Age metal: towards the formulation of the problem. *Vestnik arheologii, antropologii i etnografii*, (1), 31–48. (Рус.). <https://doi.org/10.20874/2071-0437-2022-56-1-3>

Drits, M.E., Bochvar, N.R., Guzey, L.S., Lysova, E.V., Padezhnova, E.M., Rokhlin, L.L., Turkina, N.I. (1979). *Dual and multi-component systems based on copper*. Moscow: Nauka. (Рус.).

Hansen, M., Anderko, K. (1962). *Structures of binary alloys*. Moscow: Izd-vo lit-ry po chernoy i tsvetnoy metallurgii. (Рус.).

Kartonova, L.V., Kechin, V.A. (2014). *Fundamentals of materials science of metallic and non-metallic substances*. Vladimir: Izd-vo Vlad. universiteta. (Рус.).

Kovalev, A.A. (2005). The Chemurchek cultural phenomenon: its origin and role in the formation of the Early Bronze Age cultures of Altai and Central Asia. In: *Zapadnaya i Yuzhnaya Sibir' v drevnosti*. Barnaul: Izd-vo Alt. un-ta, 178–184. (Рус.).

Livshits, B.G. (1990). *Metallography*. Moscow: Metallurgiya. (Рус.).

Novikov, I.I., Zakharov, M.V. (1962). *Heat treatment of metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya. (Рус.).

Ravich, I.G. (1983). Microstructure standards of tin bronze. In: *Khudozhestvennoye nasledie*, 38(8). Moscow: Iskusstvo, 136–143. (Рус.).

Tishkin, A.A., Grushin, S.P., Munkhboyar, Ch. (2008). Archaeological study of Bronze Age objects in the Ulaan Khudag tract (Khovd aimag of Mongolia). *Teoriya i praktika arkheologicheskikh issledovaniy*, (4), 85–92. (Рус.).

Дегтярева А.Д., <https://orcid.org/0000-0002-1945-7145>

Губин А.А., <https://orcid.org/0000-0002-7814-8473>

Блинов И.А., <https://orcid.org/0000-0001-7397-4760>

#### Сведения об авторах:

Дегтярева Анна Давыдовна, кандидат исторических наук, ведущий научный сотрудник, Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень.

Губин Алексей Александрович, аспирант, Тюменский государственный университет, Тюмень.

Блинов Иван Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, территория Ильменский заповедник, Миасс.

#### About the authors:

Degtyareva, A.D., Candidate of Historical Sciences, Leading Researcher, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen.

Gubin, A.A., Postgraduate, Tyumen State University, Tyumen.

Blinov, I.A., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Researcher, South Ural Federal Scientific Center of Mineralogy and Geoecology, UB RAS, Ilmensky Reserve, Miass.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Accepted: 15.11.2024

Article is published: 15.03.2025