

УДК 549.3:902(470.5)

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-5

**МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЯХ  
ПОЗДНЕГО БРОНЗОВОГО ВЕКА В ЮЖНОМ ЗАУРАЛЬЕ****М.Н. Анкушев<sup>1</sup>, И.А. Блинов<sup>1</sup>, И.П. Алаева<sup>2</sup>,  
Н.Б. Виноградов<sup>2</sup>, Ф.Н. Петров<sup>3</sup>, П.С. Анкушева<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; [ankushev\\_maksim@mail.ru](mailto:ankushev_maksim@mail.ru)<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет,  
г. Челябинск, 454080 Россия<sup>3</sup>Челябинский государственный университет, г. Челябинск, 454001 Россия

Статья поступила в редакцию 19.11.2021 г., принята к печати 13.12.2021 г.

**MINERAL INCLUSIONS IN THE LATE BRONZE AGE METAL OBJECTS  
OF SOUTHERN TRANSURALS****M.N. Ankushev<sup>1</sup>, I.A. Blinov<sup>1</sup>, I.P. Alaeva<sup>2</sup>,  
N.B. Vinogradov<sup>2</sup>, F.N. Petrov<sup>3</sup>, P.S. Ankusheva<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Chelyabinsk oblast,  
456317 Russia; [ankushev\\_maksim@mail.ru](mailto:ankushev_maksim@mail.ru)<sup>2</sup>South Ural State Humanitarian Pedagogical University, Chelyabinsk, 454080 Russia<sup>3</sup>Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, 454001 Russia

Received 19.11.2021, accepted 13.12.2021

**Аннотация.** Работа посвящена определению типов меднорудного сырья, основанному на анализе минеральных включений и состава металлических предметов из материалов поселений позднего бронзового века Южного Зауралья (XIX–XIII вв. до н.э.). Состав сплавов, включений сульфидов, оксидов и металлов в изделиях установлен методом сканирующей электронной микроскопии. В изделиях отмечено доминирование меди и оловянной бронзы при подчиненной роли мышьяковой бронзы. Наличие включений халькозина и борнита в большинстве предметов говорит об использовании богатых руд зоны вторичного сульфидного обогащения. Общее низкое количество сульфидов в изделиях Южного Зауралья по сравнению с аналогами может свидетельствовать об использовании смешанных оксидных и сульфидных рудных концентратов. Высокие концентрации Se и Te в сульфидах свидетельствуют об использовании руд колчеданных или скарновых месторождений.

**Ключевые слова:** металлические изделия, медь, бронза, сульфиды, поздний бронзовый век, Южное Зауралье.

**Abstract.** The paper is devoted to the determination of copper raw material types based on the analysis of mineral inclusions and the composition of metal objects from the Late Bronze Age settlements of the Southern Transurals (XIX–XIII centuries BC). The composition of alloys, inclusions of sulfides, oxides and metals of objects was established by scanning electron microscopy. The composition of objects is dominated by copper and tin bronze, with a subordinate role of arsenic bronze. The presence of chalcocite and bornite inclusions in most objects indicates the use of rich ores from secondary sulfide enrichment zone. In comparison with analogs, the low total amount of sulfides in the Southern Transuralian metal objects may indicate the use of mixed oxide and sulfide concentrates. The high Se and Te concentrations of sulfides are indicative of using of ores of volcanic-hosted massive sulfide or skarn deposits.

**Keywords:** metal objects, copper, bronze, sulfides, Late Bronze Age, Southern Transurals.

**Для цитирования:** Анкушев М.Н., Блинов И.А., Алаева И.П., Виноградов Н.Б., Петров Ф.Н., Анкушева П.С. Минеральные включения в металлических изделиях позднего бронзового века в Южном Зауралье. Минералогия, 7(4), 72–84. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-5

**For citation:** Ankushev M.N., Blinov I.A., Alaeva I.P., Vinogradov N.B., Petrov F.N., Ankusheva P.S. Mineral inclusions in the late bronze age metal objects of Southern Transurals. Mineralogy, 7(4), 72–84. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-5.

## Введение

Масштабное изучение состава и структуры металлических предметов из материалов южноуральских памятников бронзового века началось в лаборатории естественнонаучных методов Института археологии РАН под руководством Е.Н. Черных в 60-е годы XX века (Кузьминых, 2021). Благодаря крупным выборкам анализов металлов и медных руд удалось выделить индикаторные химико-металлургические группы металла, которые актуальны и сейчас (Черных, 1970; Черных, Кузьминых, 1989). В настоящее время наибольшее количество работ по изучению состава и структуры металлических изделий Южного Урала выполняется А.Д. Дегтяревой и С.В. Кузьминых. Авторы этих исследований выделяют технологическую специфику металлопроизводства Южного Урала на разных этапах бронзового века (Дегтярева, 2010; Дегтярева и др., 2019).

С одной стороны, металлические артефакты являются готовыми изделиями специализированной формы и, следовательно, позволяют установить, для какой функциональной задачи использовался тот или иной сплав. Изучая структуру металлического изделия, можно установить особенности металлообработки. Типологические особенности оружия, украшений и некоторых крупноразмерных хозяйственных предметов (например, ножей, серпов, секачей и др.) позволяют на основе типологических особенностей относить характерные изделия к определенным археологическим культурам и даже приблизительно датировать находки. С другой стороны, в древности металлические изделия являлись ценными предметами, которые могли длительное время передаваться из рук в руки, продаваться, меняться и переноситься на дальние расстояния новым владельцем. В этом случае, достоверную информацию о принадлежности предмета к определенной культуре несут лишь крупные серии идентичных предметов. Для определения источников медного сырья и технологических особенностей металлургии наилучшим образом

подходят металлургические шлаки. Являясь отходами производства, они не представляли особой ценности как продукт обмена, следовательно, не перемещались и оставались вблизи (или на) месте производства. Шлаки содержат индикаторные реликтовые и новообразованные минералы, а также капли металла, выплавленные непосредственно из руд. В случае металлических изделий эта информация может быть искажена в результате последующих операций с ними (переплавка, изготовление из лома или нескольких разнородных слитков).

Тем не менее, многочисленные анализы состава и структуры металлических изделий нивелируют выбросы и надежно характеризуют уровень развития и технологические особенности металлургии в древности. Для металлических изделий Южного Урала исследователями наиболее широко применялся метод спектрального анализа (Черных, 1970), а в последние годы также распространены исследования состава при помощи рентгенофлуоресцентного анализа (Дегтярева и др., 2019; Виноградов и др., 2020). Для изучения особенностей металлообработки в древности и фиксирования включений в металле использовался метод металлографии (оптическая микроскопия) и микротвердометрия (Дегтярева, 2010; Виноградов и др., 2017).

Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) распространен в отечественной археометаллургии в гораздо меньшей степени. Однако, по нашему мнению, он имеет ряд преимуществ над широко распространенными спектральным, рентгенофлуоресцентным анализами и оптической микроскопией. Рентгенофлуоресцентный анализ является неразрушающим методом (требует только зачистки поверхности участка изделия от патины) и обладает большей чувствительностью, однако не позволяет надежно фиксировать элементы легкой Ti. Для полуколичественного спектрального анализа требуется частица металла, метод демонстрирует низкую чувствительность, но при этом имеет наилучшую представительность валового анализа. Электронно-микроскопический анализ частиц ме-

талла позволяет получать как площадные, так и точечные анализы различных фаз бронз и минеральных включений. Частица металла, помещенная в полированный препарат из эпоксидной смолы, сохраняется и в дальнейшем пригодна для других видов анализа (металлография, измерение микротвердости, ЛА-ИСП-МС). Площадной анализ изделия имеет относительно большую погрешность, однако для решения поставленных задач данная методика является оптимальной.

Таким образом, электронная микроскопия ввиду своей универсальности выбрана в качестве основного метода исследования в данной работе. Цель работы заключается в определении металлических сплавов и типов используемых медных руд в позднем бронзовом веке на территории Южного Зауралья. На основе полученных результатов предполагается установить зависимость типов медных сплавов от функционального назначения изделий и их культурно-хронологической принадлежности. Научная новизна заключается также в привлечении новых, ранее не исследованных металлических артефактов.

### Материалы и методы

Исследованная коллекция включает 43 металлических изделия из археологических фондов Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета ЮУрГГПУ (г. Челябинск) и заповедника Аркаим (Челябинская обл.). Предметы обнаружены при стационарных раскопках неукрепленных поселений позднего бронзового века Кулевчи III, Большая Березовая-2, Малая Березовая-4 и Чебаркуль III, а также найдены в ходе подъемных сборов с поверхности поселений позднего бронзового века Калачево I, Таукаево (Кыскайкуль), Старокумляжское и в ходе разведок в Аргаяшском, Красноармейском (у с. Берсеневка), Пластовском (у с. Степное), Кизильском и Брединском (у пос. Морозовка) районах Челябинской области (рис. 1). Хронологические рамки исследования ограничены XIX–XIII вв. до н. э. и охватывают практически весь поздний бронзовый век Южного Зауралья, за исключением самого раннего синташтинского этапа укрепленных поселений. В культурном отношении выборка предметов включает материалы петровской (раннеалакульской), алакульской, черкаскульской культур, а также финала бронзового века (рис. 2).

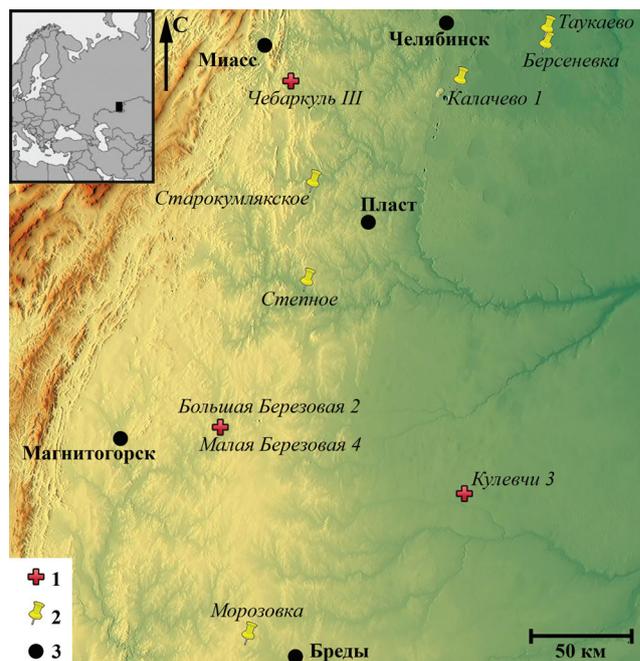


Рис. 1. Расположение археологических памятников в Южном Зауралье.

1 – опорные поселения; 2 – места случайных находок; 3 – современные населенные пункты.

Fig. 1. Location of archaeological sites in the Southern Transurals.

1 – Bronze Age basic settlements; 2 – occasional archaeological findings; 3 – present-day towns and settlements.

**Поселение Кулевчи III** расположено на р. Караталы-Аят в Варненском районе Челябинской области. Поселение вскрыто раскопом, площадью около 3000 м<sup>2</sup> Н.Б. Виноградовым и Г.Б. Здановичем в 1978–1980 г. Руинированные сооружения содержали материалы петровской и алакульской культур. Время функционирования поселения – XIX–XVII вв. до н. э. Из культурного слоя памятника происходят около 100 медных и бронзовых предметов. Изученная выборка содержит 12 предметов как хозяйственного назначения (ножи, иглы, фрагмент котла), так и боевого (топор), а также слиток металла. Состав всей коллекции металлических изделий поселения Кулевчи III ранее был установлен методом эмиссионной спектроскопии, структурные особенности металла изучены методом оптической микроскопии (металлографии) (Дегтярева и др., 2001).

**Поселение Большая Березовая-2** находится на левом берегу р. Гумбейка (бассейн р. Урал) в Нагайбакском районе Челябинской области. В 2006–2009 гг. И.П. Алаевой над тремя жилищными впадинами был заложен раскоп площадью 756 м<sup>2</sup>. Более 90 % керамического комплекса пред-



Рис. 2. Металлические изделия позднего бронзового века Южного Зауралья.

1 – серп, поселение Большая Березовая-2, шифр 307Б/3368; 2 – секач, поселение Старокумляжское, шифр 1/194; 3 – нож, поселение Кулевчи III, шифр 395к/5735; 4 – секач, поселение Таукаево (Кыскайкуль), шифр 97к/208; 5 – пешня, случайная находка, Брединский район, Челябинская область, шифр 2021/1; 6 – кинжал, случайная находка, Аргаяшский район, Челябинская область, шифр х/3; 7 – браслет, поселение Чебаркуль III, шифр 337ч/10445; 8 – топор, поселение Кулевчи III, шифр 395к/6336; 9 – наконечник стрелы, поселение Малая Березовая-4, шифр 494Б/4710; 10 – бляшка большая, поселение Чебаркуль III, шифр 337ч/17651.

Fig. 2. Late Bronze Age metal objects of Southern Transurals.

1 – sickle, settlement of Bolshaya Berezovaya-2, code 307Б/3368; 2 – cleaver, settlement of Stary Kumlyak, code 1/194; 3 – knife, settlement of Kulevchi III, code 395к/5735; 4 – cleaver, settlement of Taukaevo (Kyskaikul), code 97к/208; 5 – pick, occasional finding, Bredy region, Chelyabinsk oblast, code 2021/1; 6 – dagger, occasional finding, Argayash region, Chelyabinsk oblast, code х/3; 7 – bracelet, settlement of Chebarkul III, code 337ч/10445; 8 – axe, settlement of Kulevchi III, code 395к/6336; 9 – arrowhead, settlement of Malaya Berezovaya-4, code 494Б/4710; 10 – large plaque, settlement of Chebarkul III, code 337ч/17651.

ставлено материалами алакульской культуры степной зоны Южного Зауралья, один фрагмент сосуда принадлежал синташтинской культуре. Площадка поселения осваивалась в период XIX–XVI вв. до н. э. Всего в слое поселения было обнаружено семь медных и бронзовых предметов и незначительное количество бронзового лома и фрагментов медной руды. Изученная выборка включает четыре предмета: рыболовный крючок, шило, серп и лом металла.

**Поселение Малая Березовая-4** расположено у западного склона г. Малой Березовой, на площадке надпойменной террасы левого берега р. Гумбейка в Нагайбакском районе Челябинской области. В 2003–2005 гг. И.П. Алаевой на противоположных участках поселения двумя раскопами (общей площадью 945 м<sup>2</sup>) исследованы жилище № 1 с прилегающей территорией и часть жилища № 5. В куль-

турном слое поселения выделяются два строительных горизонта: алакульской культуры и финала бронзового века. Период существования поселения – XVII–XIV вв. до н. э. Всего в слоях поселения обнаружено 14 предметов из меди и бронзы. Изученная выборка включает пять предметов: декоративное назначение имеют бляшка, украшение наконечника и серпик, хозяйственное – пробойник, боевое – наконечник стрелы.

**Поселение Чебаркуль-III** находится на берегу небольшой р. Кундуруша в Чебаркульском районе Челябинской области. В период 2011–2017 гг. под руководством И.П. Алаевой на площадке поселения исследовано 1731 м<sup>2</sup>. Культурные отложения поселения представлены двумя строительными горизонтами: алакульской культуры и черкаскульско-межовского культурного комплекса. Период

функционирования памятника – XVII–XIV вв. до н. э. В культурном слое поселения обнаружено 25 предметов из меди и бронзы. Выборка включает 12 предметов: хозяйственное назначение имеют ножи, секачи, проволока и шило, украшения представлены браслетом и нашивными бляшками, также в выборку вошли слитки металла.

**Подъемные сборы, случайные находки.** Большая часть предметов обнаружена в результате подъемных сборов с поверхности поселений бронзового века, расположенных в лесосостепных районах Челябинской области. В материалах поселений (Калачево I, Таукаево (Кыскайкуль), Старокумлякское) представлены изделия и орудия алакульской культуры, финала бронзового века. Часть находок сделана в ходе случайных сборов, без привязки к памятникам древности в разных районах Челябинской области: Аргаяшском, Красноармейском, Пластовском, Кизильском, Брединском.

Выборка случайных находок включает 12 предметов: серпы, секачи, нож, тесло, долото, пещня имеют хозяйственное назначение, кинжалы – боевое. Для серпов из поселений Таукаево (Кыскайкуль) и Старокумлякское, а также для случайно найденных кинжалов у сел Берсеневка и Кизильское ранее установлены состав методами спектрального и рентгенофлуоресцентного анализа, а также структурные особенности сплавов методом металлографии (Дегтярева и др., 2019).

Микрочастицы металла для СЭМ анализа отбирались ювелирным лобзиком для наименьшего повреждения изделий, помещались в эпоксидную смолу и полировались. Состав металлических изделий, минеральные включения и особенности их состава определены на СЭМ Tescan VEGA 3 sbu (ускоряющее напряжение 20 кВ, живое время 120 с, поглощенный ток на эталоне Co около 260 pA). Состав минеральных включений и различных фаз бронз анализировался точно. Для характеристики общего состава металлического изделия снимался общий спектр по растру площадью  $1 \pm 0.1 \text{ мм}^2$ .

### Результаты исследований

**Состав металлических изделий** приведен в таблице. Основным компонентом всех изделий является Cu, главными примесями – Sn, As, Fe, реже S, Pb, Ni, Zn, Co, Sb и Cd.

**Включения сульфидов.** Большинство изделий (38 шт., 88.4 %) содержат новообразованные

микровключения сульфидов Cu, Pb и Bi. Наиболее распространены сульфиды Cu, размер самых крупных включений достигает 20 мкм, наиболее часто встречаются более мелкие индивиды в 1–5 мкм. Форма включений разнообразна: удлиненные, часто округлые или каплевидные, угловатые индивиды встречаются редко (рис. 3а–г). Включения располагаются в сплошной массе меди или бронзы по границам зерен металла, иногда, – цепочками, маркируя межзерновые трещины (рис. 3д).

Состав минералов характеризуется различным соотношением Cu : Fe : S и отвечает стехиометрии борнита, железистого халькозина, халькозина и частично преобразованного десульфуризированного халькозина. Между предметами из различных поселений и обнаруженными в них сульфидами корреляция не наблюдается (рис. 4а). Основными примесями в сульфидах являются Se и Te. Примесь Se в количествах, превышающих предел обнаружения (0.1 мас. %), зафиксирована в 31 зерне из 43 проанализированных (72.1 %), Te установлен только в 12 зернах (27.9 %). Содержание Se в сульфидах колеблется от 0 до 13.68 мас. %, Te – от 0 до 2.76 мас. % (рис. 4б).

Сульфид Pb обнаружен в трех изделиях, сульфид Bi зафиксирован в одном изделии, селенид Pb зафиксирован также в одном изделии в виде субмикронных включений (табл.). Минералы диагностированы по качественному спектру.

Пять изделий не содержат сульфидных включений: лом металла (шифр 307Б/3392) с поселения Малая Березовая-4; пробойник (шифр 494Б/4704) и декоративный серпик (шифр 494Б/4705) из поселений Большая Березовая-2; секач из поселения Таукаево (Кыскайкуль) (шифр 97к/208) и латунный кинжал, найденный в Аргаяшском районе (шифр х/3). Интересной особенностью секача из поселения Таукаево (Кыскайкуль) являются изометричные неоднородные включения размером до 20 мкм. Эти включения состоят из оксидов Cu, As и Sb, а в качестве примесей присутствуют оксиды Pb, Bi, Ni, Sn.

**Включения оксидов Fe.** В десяти изделиях установлены новообразованные микровключения шпинелидов ряда магнетит-купрошпинель. Они представлены кубическими и кубоктаэдрическими кристаллами размером до 10 мкм, а также их сростками (рис. 3г). Состав измерен в 15 зернах и варьирует в следующих пределах (мас. %): FeO 67.8–96.4 (среднее 90.4), CuO 3.6–32.2 (среднее 9.3), MnO

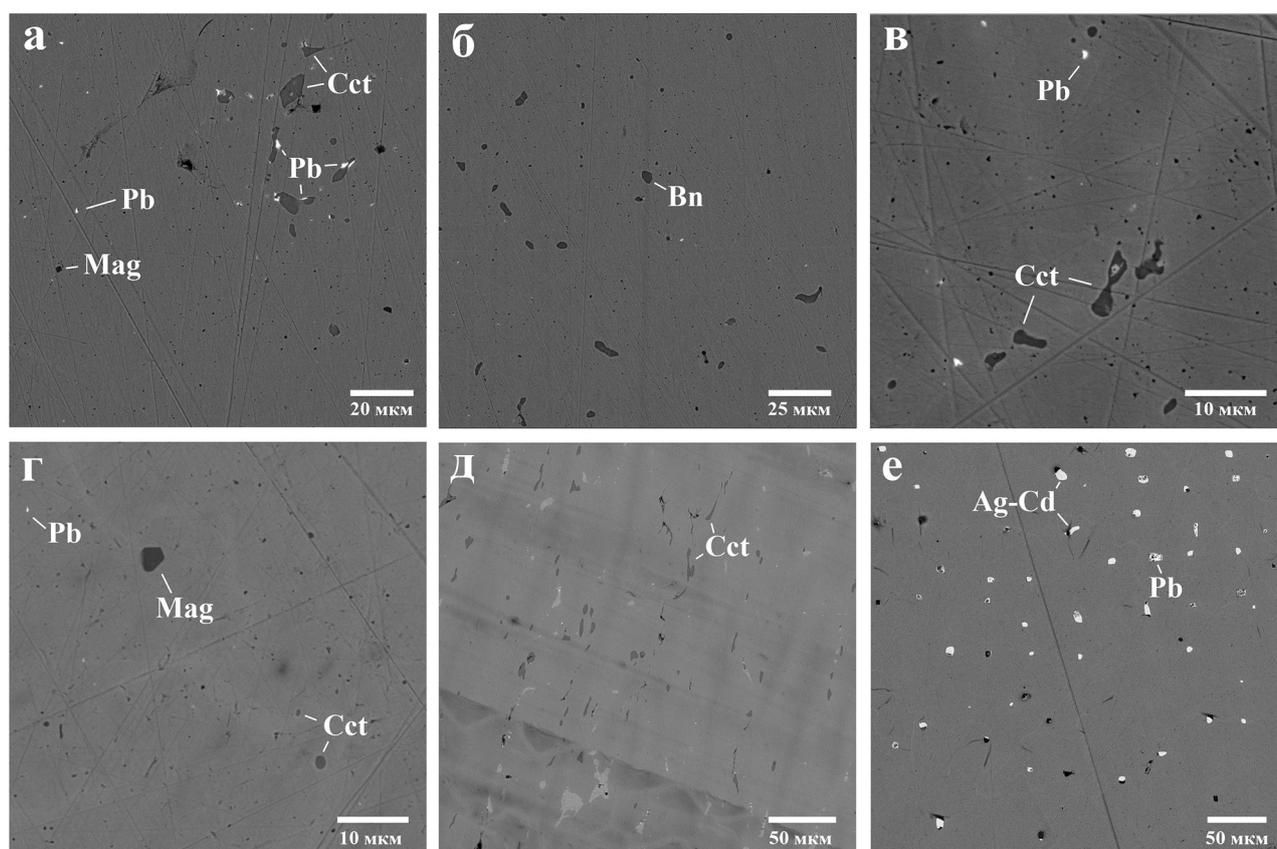


Рис. 3. Минеральные включения в металлических изделиях:

а – металлический свинец (Pb) на периферии включений халькозина (Cct), изделие 337ч/17650; б – мелкие капли борнита (Bn), изделие 337ч/17648; в – включения халькозина и металлического свинца, изделие 494Б/4710; г – включение новообразованного магнетита (Mag), изделие 94к/35; д – включения халькозина в межзерновом пространстве металла, изделие x/1; е – включения металлического свинца и Pb-Cd-Ag фазы, изделие x/3.

Fig. 3. Mineral inclusions in metal objects:

а – metallic lead (Pb) at the margin of the chalcocite inclusions (Cct), object 337ч/17650; б – small bornite (Bn) droplets, object 337ч/17648; в – chalcocite and metallic lead inclusions, object 494Б/4710; г – inclusion of newly formed magnetite (Mag), object 94к/35; д – interstitial chalcocite inclusions, object x/1; е – inclusions of metallic lead and a Pb-Cd-Ag phase, object x/3.

0.0-0.6 (среднее 0.1). В единичных случаях в составе присутствуют примеси Zn, Sn и Si. Крайне редко в металлических предметах встречаются реликтовые включения кварца размером 20–25 мкм.

**Включения металлов.** В большинстве изделий (30 шт., 69.8 %) присутствуют микровключения металлического свинца. Форма его включений изометричная, вытянутая, кавернозная, многие располагаются на границе металла и сульфидных капель (рис. 4а). Включения имеют субмикронный размер и определяются лишь по качественному спектру, во многих фиксируется примесь Bi. Только в латунном кинжале из Аргаяшского района обнаружен металлический свинец с примесями Ag (1.16 мас. %) и Bi (0.77 мас. %).

В двух изделиях (слиток из материалов поселения Чебаркуль III (шифр 337ч/17735) и случайно найденной пещне у пос. Морозовка (шифр 2021/1)) зафиксированы включения металлического висмута без примесей. Во втором случае размер включения достигает 5 мкм.

В серпе из поселения Таукаево (Кыскайкуль) и случайно найденной пещне у пос. Морозовка обнаружены микровключения металлического серебра. В первом случае субмикронные включения приурочены к индивиду куприта в массе металла, во втором случае включение размером около 7 мкм представляет собой сплав состава (мас. %): Ag 88.60, Cu 8.60, Sn 2.84. В латунном кинжале из Аргаяшского района зафиксированы включения сплава сложного состава (мас. %): Ag 74.71; Cd 16.67; Pb 1.43.

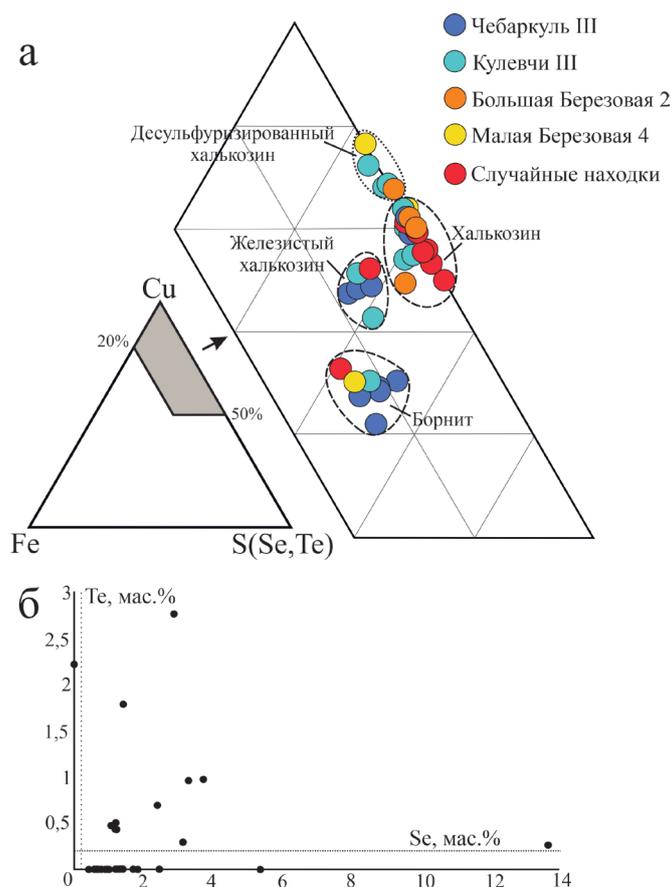


Рис. 4. Особенности состава включений сульфидов в металлических изделиях бронзового века Южного Зауралья:

а – фрагмент диаграммы Cu–Fe–S с точками состава сульфидов из металлических изделий; б – соотношение Se и Te в составе сульфидов (пунктир – предел обнаружения).

Fig. 4. Compositional features of sulfide inclusions in the Bronze Age metal objects of the Southern Transurals:

а – fragment of Cu–Fe–S diagram with composition of sulfides; б – Se/Te ratio in composition of sulfides (dash – detection limit).

### Обсуждение результатов

**Основные сплавы в позднем бронзовом веке Южного Зауралья.** Для группировки легированных сплавов по составу использованы следующие границы: As >0.1 мас. %, Sn, Pb, Zn >0.5 мас. % (Дегтярева, 2009). Согласно этим условиям выборка была разбита на пять основных групп (рис. 5).

1) Медь (22 изделия, 51.2 %). Эта наиболее многочисленная группа включает изделия из чистой меди и меди с небольшим количеством примесей. Из-за отсутствия сведений о специализированном получении железистой бронзы в древности, в эту группу также вошли изделия с высоким содержанием Fe (0.74–4.27 мас. %) без других легирующих примесей (секачи и бляшки из поселения Чебаркуль III).

2) Оловянная бронза (12 изделий, 27.9 %). Помимо различных изделий с высоким содержанием Sn, эта группа также включает проволоку из оловянной бронзы из поселения Чебаркуль III (шифр 337ч/10447), где зафиксирована примесь Pb (5.55 мас. %).

3) Мышьяковая бронза (шесть изделий, 13.9 %). Помимо украшений (браслета из поселения Чебаркуль III и бляшки с примесями Fe, Ni и Sb с поселения Малая Березовая-4) сюда вошли также предметы хозяйственного назначения – рыболовный крючок из поселения Большая Березовая-2 (шифр 307Б/3361), секач из поселения Таукаево, случайно найденная пешни у пос. Морозовка и слитки из поселения Чебаркуль III.

4) Оловянно-мышьяковая бронза (два изделия, 4.7 %). Из нее изготовлен нож из поселения Кулевчи

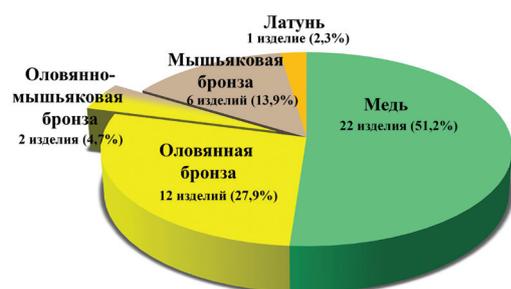


Рис. 5. Распределение сплавов среди металлических изделий позднего бронзового века в Южном Зауралье.

Fig. 5. Distribution of alloys among the Late Bronze Age metal objects of the Southern Transurals.

III (шифр 395к/8188), где также отмечены примеси Fe и Pb, а также случайно найденное долото у с. Степное (шифр х/1), в котором отмечена примесь Ni.

5) Латунь (1 изделие, 2,3 %). Случайно найденный кинжал из латуни с примесями Ag, Ni и Cd.

В краевых частях изделия замещены патиной, состоящей из куприта и нантокита. Иногда гипергенный куприт развит между зернами металла.

Для Южного Зауралья и других регионов Северной Евразии характерно доминирование меди и оловянных бронз среди используемых сплавов при подчиненной роли мышьяковой бронзы (Черных, 1970; Дегтярева и др., 2001, 2019). Присутствие в выборке предметов из мышьяковых бронз может иметь как функциональное, так и хронологическое объяснение. В частности, применение мышьяка в составе браслета (шифр 337ч/10445) и бляшки с примесями Fe, Ni и Sb из поселения Малая Березовая-4 (шифр 494Б/4653)) может объясняться необходимостью получения специального цвета. Однокомпонентная мышьяковая бронза отмечена в трех предметах хозяйственного назначения, возраст и культурная принадлежность которых может отличаться от остальной выборки. Рыболовный крючок из поселения Большая Березовая-2 (шифр 307Б/3361) может соответствовать раннему синташтинскому этапу функционирования поселения. Случайно найденная пешня у пос. Морозовка типологически сходна с изделиями рубежа III–II тыс. до н. э. и начала II тыс. до н.э. (Корочкова и др., 2020; Алаева и др., 2013). В этот период мышьяковые бронзы широко использовались древними металлургами Южного Урала (Дегтярева, 2010). Также пешня имеет прямые аналогии с втульчатymi горнопроходческими орудиями Каргалинских рудников (Черных, 2004). Секач из мышьяковой

бронзы из поселения Таукаево (Кыскайкуль) имеет не типичную форму, и в нем отсутствуют включения сульфидов, но содержит оксиды сложного состава. Отсутствие аналогов этого изделия позволяет предположить его импортное происхождение.

Секачи из поселения Чебаркуль III (шифр 337ч/17648, 337ч/17649) типологически сходны с секачами из клада Сосновая Маза (Черных, 1966). Как и в изделиях клада, их отличает высокая примесь Fe при отсутствии других легирующих компонентов. Ранее предполагалось, что такой состав получен при металлургическом переделе халькопирита в ассоциации с пиритом, однако к настоящему времени в Урало-Казахстанском регионе не имеется достоверных доказательств добычи и переработки первичных сульфидных руд в бронзовом веке. Присутствие включения борнита и железистого халькозина в секачах из поселения Чебаркуль III объясняет появление меди с высокой примесью Fe переработкой богатых Cu-Fe сульфидных руд подзоны цементации зоны окисления сульфидных месторождений.

Единственным изделием из латуни является случайно найденный кинжал из Аргаяшского района, типологически относящийся к концу бронзового века. Изделия из латуни известны с раннего бронзового века, однако они редки для эпохи бронзы и более характерны для раннего железного века (Дегтярева, 2010).

Исследование металлических изделий из южноуральских поселений не выявило зависимостей между составом сплава и назначением хозяйственных или боевых предметов. Для украшений намного чаще использовали бронзы различного состава и медь с примесями, что обуславливает необычный цвет металла и обусловлено эстетическими мотивами. Доминирование изделий из меди и оловянной бронзы над другими сплавами характерно для всего исследованного хронологического периода. Использование различных сплавов в изделиях петровской (раннеалакульской), алакульской и эпохи финальной бронзы не зафиксировано.

**Использование сульфидных руд.** Исследования металлургических шлаков позднего бронзового века позволили установить, что в Южном Зауралье уже с XIX в. до н. э. на памятниках петровской и алакульской культур широко используются богатые борнит-ковеллин-халькозиновые руды (Григорьев, 2013; Artemyev, Ankushev, 2019). Археологические раскопки на Новотемирском руднике бронзового века доказали разработку глубоких

Таблица  
Table

## Состав металлургических предметов позднего бронзового века Южного Зауралья

## Composition of the Late Bronze Age metal items of the Southern Transurals

№ п/п	Место находки	Шифр изделия	Изделие	Датировка вв. до н.э.	Культурно-типологическая принадлежность	Содержание, мас. %							Сумма	Минеральные включения	
						Cu	Fe	Sn	As	Ni	Pb	Ag			S
1		337ч/24	Нож	XV-XIV	Черкаскульско-Межовская	99.81	-	-	-	-	-	-	0.19	100.0	Cct, Pb
2		337ч/25	Нож	XV-XIV	Черкаскульско-Межовская	99.20	-	-	-	-	-	-	-	99.20	Cct, Pb
3		337ч/10445	Браслет	XV-XIV	Черкаскульская	96.19	0.22	-	3.59	-	-	-	-	100.0	Cct
4		337ч/10447	Проволока	XVII-XVI	Алакульская	84.18	-	10.28	-	-	5.55	-	-	100.0	Cct, Pb
5		337ч/10449	Шило	XVII-XVI	Алакульская	94.62	-	5.18	-	-	-	0.19	-	100.0	Cct, Pb
6		337ч/17648	Секач	XV-XIV	Черкаскульско-Межовская	99.50	0.74	-	-	-	-	-	-	100.24	Bn, Pb
7	Чебаркуль III	337ч/17649	Секач	XV-XIV	Черкаскульско-Межовская	97.98	2.26	-	-	-	-	-	-	100.24	Cct
8		337ч/17650	Нож (обломок серпа)	XVII-XVI	Алакульская	99.08	-	-	-	-	-	-	-	99.08	Cct, Mag, Pb
9		337ч/17651	Бляшка большая	XV-XIV	Черкаскульско-Межовский	99.50	0.98	-	-	-	-	-	-	100.48	Cct, Mag
10		337ч/17652	Бляшка малая*	XV-XIV	Черкаскульско-Межовская	94.42	4.27	-	-	1.04	-	-	-	100.0	Bn, Pb
11		337ч/17735	Слиток	XVII-XVI	Алакульская	97.63	1.20	-	0.43	-	-	-	-	99.25	Bn, Bi
12		337ч/30013	Слиток	XV-XIV	Черкаскульско-Межовская	98.41	-	1.59	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Pb
13		395к/722	Котел	XIX-XVII	Алакульская	99.94	0.27	-	-	-	-	-	-	100.2	Cct
14		395/1224	Игла	XIX-XVII	Алакульская	97.01	0.86	2.13	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Pb
15		395к/1226	Нож	XIX-XVII	Алакульская	93.76	-	6.24	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Pb
16		395к/1781	Слиток	XIX-XVII	Алакульская	100.0	-	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Pb
17		395к/1783	Нож	XIX-XVII	Алакульская	100.0	-	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Mag, Pb
18	Кулевчи III	395к/5735	Нож	XIX-XVII	Алакульская	99.37	0.37	-	-	-	-	-	-	99.74	Cct
19		395к/5967	Нож	XIX-XVII	Алакульская	100.36	-	0.24	-	-	-	-	-	100.62	Cct, Mag, Pb
20		395к/7722	Игла	XIX-XVII	Алакульская	100.39	-	-	-	-	-	-	-	100.39	Cct, Mag
21		395к/8188	Нож	XIX-XVII	Алакульская	96.78	0.81	0.98	1.12	-	-	-	-	100.0	Bn, Pb
22		395к/6336	Топор	XIX-XVII	Алакульская	99.65	0.35	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Mag

№ п/п	Место находки	Шифр изделия	Изделие	Датировка вв. до н.э.	Культурно-типологическая принадлежность	Содержание, мас. %							Сумма	Минеральные включения		
						Cu	Fe	Sn	As	Ni	Pb	Ag			S	
23		307Б/3361	Крючок рыболовный	XVII-XVI	Алакульская	95.24	-	-	4.76	-	-	-	-	-	100.0	Cct
24	Большая Березовая-2	307Б/3365	Шило	XVII-XVI	Алакульская	99.26	-	0.74	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Pb
25		307Б/3368	Серп Лом	XVII-XVI	Алакульская	100.0	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Gn, Pb
26		307Б/3392	металла	XVII-XVI	Алакульская	99.51	-	-	-	-	-	-	-	-	99.51	-
27		494Б/4653	Бляшка**	XV-XIII	Финал БВ	95.51	3.16	-	0.63	0.47	-	-	-	-	100.0	Bn
28		494Б/4704	Пробойник ювелирный	XVII-XVI	Алакульская	99.56	-	-	-	-	0.44	-	-	-	100.0	Pb
29	Малая Березовая-4	494Б/4705	Серпик декоративный	XVII-XVI	Алакульская	90.17	-	9.83	-	-	-	-	-	-	100.0	Pb
30		494Б/4708	Украшение наосника	XVII-XVI	Алакульская	90.15	-	9.85	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Pb
31		494Б/4710	Наконечник стрелы	XVII-XVI	Алакульская	98.79	-	1.21	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct
32	Калачево I	94к/35	Серп	XVII-XVI	Алакульская	99.73	0.22	-	-	-	-	-	0.06	-	100.0	Cct, Mag, Pb
33	Таукаево	97к/88	Серп	XVII-XVI	Алакульская	99.22	-	-	-	-	-	0.30	-	-	99.52	Gn, Mag, Ag, Pb
34	(Кыскайкуль)	97к/89	Тесло	XVII-XVI	Алакульская	98.42	-	1.58	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Mag, Pb
35		97к/208	Секач	XV-XIII	Алакульская	98.56	-	-	1.11	-	-	-	-	-	99.68	Pb
36	Возле с. Берсенева	УК-III/ VII-1	Нож-кинжал с упором	XV-XIII	Финал БВ	96.36	-	3.64	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Pb
37	Старо-кумлякское	1/193	Обломок ножа	XV-XIII	Финал БВ	100.0	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Pb
38		1/194	Секач	XV-XIII	Финал БВ	98.96	0.10	0.67	-	-	-	-	0.27	-	100.0	Cct, Mag, Pb
39		1/241	Нож	XV-XIII	Финал БВ	99.83	0.18	-	-	-	-	-	-	-	100.0	Gn, Pb
40	Возле с. Степное	х/1	Долото	XV-XIII	Финал БВ	88.37	-	10.09	0.92	0.37	-	-	0.25	-	100.0	Cct, Pb
41	Возле с. Кизильское	х/2	Нож-кинжал с упором	XV-XIII	Финал БВ	100.0	-	-	-	-	-	-	-	-	100.0	Bis(?), Klt(?), Pb
42	Аргаяшский район	х/3	Кинжал***	XV-XIII	Финал БВ	82.78	-	-	-	0.71	-	3.30	-	-	100.0	Pb
43	Возле пос. Морозовка	2021/1	Пешня	XIX-XVI	Петровская или алакульская	97.68	-	-	2.32	-	-	-	-	-	100.0	Cct, Ag, Bi

Примечание. В составе присутствуют: \* – 0.27 мас. % Co, \*\* – 0.23 мас. %, \*\*\* – 12.97 мас. % Zn и 0.24 мас. % Cd. Cct – халькозин, Bn – борнит, Gn – галенит, Mag – магнетит, Bis – висмутит, Klt – клаусталит, Pb – свинец металлический, Ag – серебро металлическое, Bi – висмут металлический. Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. The composition contains: \* – 0.27 wt. % Co, \*\* – 0.23 wt. %, \*\*\* – 12.97 wt. % Zn and 0.24 wt. % Cd. Cct – chalcocite, Bn – bornite, Gn – galena, Mag – magnetite, Bis – bismuthine, Klt – claustalite, Pb – metallic lead, Ag – metallic silver, Bi – metallic bismuth. Dash – below detection limit.

горизонтов месторождения вертикальными шахтами и наклонными выработками в XVII в. до н. э. (Анкушева и др., 2021). Наше исследование металлических изделий подтвердило повсеместное использование сульфидных руд металлургами Южного Зауралья практически на всем протяжении II тыс. до н. э., что доказывает присутствие микровключений сульфидов в подавляющем большинстве изученных артефактов. Причины отсутствия сульфидов в некоторых изделиях объяснимы: лом металла из поселения Малая Березовая 4 может быть продуктом переплавов; декоративный серпик из поселения Большая Березовая 2 изготовлен из высоколегированной бронзы, для которого предполагается особая технология изготовления (например, проковка); секач из поселения Таукаево (Кыскайкуль) и случайно найденный латунный кинжал значимо отличаются от остальной выборки по особенностям состава сплава и могут быть изготовлены в другом месте или в другое время. Также эти предметы могли быть изготовлены из окисленных малахит-азуритовых руд.

Тем не менее, по валовым анализам лишь в пяти случаях общая концентрация S в изделии превысила предел обнаружения этого элемента (0.1 мас. %) (табл.). К сожалению, большая часть анализов древнего металла региона выполнена методами спектрального, атомно-эмиссионного и рентгенофлуоресцентного анализа, которые не устанавливают содержание S в металле, поэтому сравнительная база данных весьма скромна. Количество S в исследованных изделиях сходно с металлом поселения Горный в Южном Предуралье, сырьем для которого служили богатые сульфидные руды Каргалинского месторождения медистых песчаников (Черных, 2004). При этом в каплях металла в шлаке из поселения Токское, также приуроченному к Каргалам, зафиксированы более высокие содержания S (Анкушев и др., 2019). Для сравнения, металлические изделия энеолитических памятников Балкан содержат от 0.45 до 5 мас. % S, при этом предполагается, что полиметаллические сульфидные руды, возможно, смешивались с окисленными (Ryndina et al., 1999).

Присутствие многочисленных новообразованных сульфидов в изученных изделиях в совокупности с их малым общим количеством свидетельствует об использовании смешанных оксидных и сульфидных концентратов. Небольшое количество месторождений, бедные рудные залежи и сложность прохождения горных выработок в крепких

магматических и метаморфических горных породах (Зайков и др., 2005; Анкушева и др., 2021) приводили к разработкам ограниченных ресурсов медного сырья в позднем бронзовом веке Южного Зауралья. Археологически это подтверждается «кризисом металла», который установлен по меньшему количеству находок металла при раскопках поселений, ограбленным погребальным памятникам и отсутствием кладов (Алаева, 2014).

Высокие примеси Se и Te в новообразованных каплях борнита и халькозина в металлических изделиях могут свидетельствовать об использовании руд из верхних горизонтов подзоны цементации зоны окисления колчеданных и скарновых месторождений Южного Урала (Belogub et al., 2008). На это также указывают характерные для колчеданных руд высокие концентрации Pb и Bi, обнаруженные в сплавах, а также единичные зерна галенита, висмутина(?) и клаусталита(?) (Викентьев и др., 2019). Возможно, дополнительное концентрирование Se в новообразованных сульфидных каплях происходит при металлургическом переделе медной руды.

## Выводы

Таким образом, в позднем бронзовом веке Южного Зауралья (XIX–XIII вв. до н. э.) наиболее распространены изделия из меди и оловянной бронзы. Мышьяковая бронза практически исчезает: она используется в украшениях для придания цвета металлу, тогда как хозяйственные предметы, изготовленные из нее, исключительно редки. Эти выводы согласуются с ранее проведенными массовыми исследованиями металлических изделий бронзового века Северной Евразии (Черных, 1970; Дегтярева и др., 2001; Дегтярева и др., 2019). Подавляющее большинство предметов содержат включения сульфидов: халькозина и борнита, что говорит об использовании богатых руд подзоны вторичного сульфидного обогащения зоны окисления сульфидных месторождений. Это также подтверждается находками включений сульфидов Pb и Bi в металле. Общее низкое количество сульфидов и, соответственно, низкое содержание S в южноуральских изделиях может свидетельствовать об использовании смешанных рудных концентратов в металлургии. Высокие концентрации Se и Te во многих включениях сульфидов свидетельствует о добыче руд из колчеданных или скарновых месторождений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ННФИ в рамках научного проекта № 20-59-56007.

### Литература

Алаева И.П., Бачура О.П., Виноградов Н.Б., Григорьев С.А., Гутков А.И., Дегтярева А.Д., Дерягин В.В., Дунан Р.К., Косинцев П.А., Кузьминых С.В., Кунгурова Н.Ю., Левит А.И., Мори М., Мосин В.С., Мужич Б., Медарич И., Питман Д., Усачук А.Н., Хэнкс Б.К., Чечушков И.В., Епимахов А.В. (2013) Древнее Устье: укрепленное поселение бронзового века в Южном Зауралье. Челябинск, Абрис, 482 с.

Алаева И.П. (2014) Литейные формы алакульской культуры Зауралья (вопросы отражения уровня развития металлопроизводства). Труды IV (XX) всероссийского археологического съезда в Казани. Казань, Отечество, 520–524.

Анкушев М.Н., Файзуллин И.А., Артемьев Д.А., Блинов И.А. (2020) Металлообработка и металлургические шлаки на поселении позднего бронзового века Токское / Геоархеология и археологическая минералогия. Миасс-Челябинск, ЮУрГГПУ, 171–176.

Анкушева П.С., Алаева И.П., Анкушев М.Н., Фомичев А.В., Зазовская Э.П., Блинов И.А. (2021) От руды к металлу: эксплуатация Новотемирского месторождения Южного Зауралья во II тыс. до н.э. *Археология, этнография и антропология Евразии*, 49(1), 30–38.

Викентьев И.В., Белогуб Е.В., Молошаг В.П., Еремин Н.И. (2019) Селен в колчеданных рудах. *Доклады Академии наук*, 484(3), 320–324.

Виноградов Н.Б., Берсенева Н.А., Алаева И.П., Алентьев Ю.М., Блинов И.А., Галибин В.А., Епимахов А.В., Илюшина В.В., Китов Е.П., Косинцев П.А., Рассомахин М.А. (2020) Кулевчи VI – могильник позднего бронзового века в Южном Зауралье. Челябинск, ЮУрГГПУ, 556 с.

Виноградов Н.Б., Дегтярева А.Д., Кузьминых С.В., Медведева П.С. (2017) Образы эпохи. Могильник бронзового века Кривое Озеро в Южном Зауралье. Челябинск, Абрис, 400 с.

Григорьев С.А. (2013) Металлургическое производство в Северной Евразии в эпоху бронзы. Челябинск, Цицеро, 660 с.

Дегтярева А.Д. (2009) Химико-металлургические группы металла синташтинской культуры. *Вестник археологии, антропологии и этнографии*, 11, 29–41.

Дегтярева А.Д. (2010) История металлопроизводства Южного Зауралья в эпоху бронзы. Новосибирск, Наука, 162 с.

Дегтярева А.Д., Виноградов Н.Б., Кузьминых С.В., Рассомахин М.А. (2019) Металлические изделия алексеевско-саргаринской культуры Среднего и Верхнего Притоболья. *Вестник археологии, антропологии и этнографии*, 47(4), 28–44.

Дегтярева А.Д., Кузьминых С.В., Орловская Л.Б. (2001) Металлопроизводство петровских племен (по материалам поселения Кулевчи 3). *Вестник археологии, антропологии и этнографии*, 3, 23–54.

Зайков В.В., Юминов А.М., Дунаев А.Ю., Зданович Г.Б., Григорьев С.А. (2005) Геолого-минералогические исследования древних медных рудников на Южном Урале. *Археология, этнография и антропология Евразии*, 24(4), 101–115.

Корочкова О.Н., Стефанов В.И., Спиридонов И.А. (2020) Святилище первых металлургов Среднего Урала. Екатеринбург, УрФУ, 214 с.

Кузьминых С.В. (2021) Историко-металлургические исследования: поиски, проблемы, решения. Аналитические исследования лаборатории естественнонаучных методов. Вып. 5. М., Институт археологии РАН, 53–77.

Черных Е.Н. (1966) О химическом составе металла клада из Сосновой Мазы. Краткие сообщения о докладах и полевых исследованиях Института археологии, 108, 123–131.

Черных Е.Н. (1970) Древнейшая металлургия Урала и Поволжья. М., Наука, 181 с.

Черных Е.Н. (2004) Каргалы. Том III: Селище Горный: Археологические материалы: Технология горно-металлургического производства: Археобиологические исследования. М., Языки славянской культуры, 320 с.

Черных Е.Н., Кузьминых С.В. (1989) Древняя металлургия Северной Евразии (сейминско-турбинский феномен). М., Наука, 320 с.

Artemyev D.A., 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*, 9(12), 746.

Belogub E.V., Novoselov K.A., Yakovleva V.A., Spiro B. (2008) Supergene sulphides and related minerals in the supergene profiles of VHMS deposits from the South Urals. *Ore Geology Reviews*, 33(3–4), 239–254.

Ryndina N., Indenbaum G., Kolosova V. (1999) Copper production from polymetallic sulphide ores in the Northeastern Balkan eneolithic culture. *Journal of Archaeological Science*, 26(8), 1059–1068.

### References

Alaeva I.P., Bachura O.P., Vinogradov N.B., Grigoriev S.A., Gutkov A.I., Degtyareva A.D., Deryagin V.V., Dunan R.K., Kosintsev P.A., Kuzminykh S.V., Kungurova N.Yu., Levit A.I., Mori M., Mosin V.S., Muzhich B., Medarich I., Pitman D., Usachuk A.N., Hanks B.K., Chchushkov I.V., Epimakhov A.V. (2013) [Ancient Ustye: a Bronze Age fortified settlement in Southern Transurals]. Chelyabinsk, Abris, 482 p. (in Russian)

- Alaeva I.P.** (2014) [Foundry forms of the Alakul culture of the Transurals: issues of the development level of metal production]. *Trudy IV (XX) vserossiyskogo arkheologicheskogo s'ezda v Kazani [Proceedings of the IV (XX) All-Russian Archaeological Congress in Kazan]*. Kazan, Otechestvo, 520–524. (in Russian)
- Ankushev M.N., Faizullin I.A., Artemiev D.A., Blinov I.A.** (2020) [Metalworking and metallurgical slags at the Late Bronze Age Tokskoe settlement]. In: *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya. [Geoarchaeology and archaeological mineralogy]*. Miass-Chelyabinsk, YUURGGPU, 171–176. (in Russian)
- Ankusheva P.S., Alaeva I.P., Ankushev M.N., Blinov I.A., Fomichev A.V., Zazovskaya E.P.** (2021) [From ore to metal: exploitation of the Novotemirsky mine, Southern Trans-Urals, in the second millennium BC]. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, **49**(1), 30–38.
- Artemyev D.A., 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*, **9**(12), 746.
- Belogub E.V., Novoselov K.A., Yakovleva V.A., Spiro B.** (2008) Supergene sulphides and related minerals in the supergene profiles of VHMS deposits from the South Urals. *Ore Geology Reviews*, **33**(3–4), 239–254.
- Chernykh E.N.** (1966) [Chemical composition of metal of the Sosnovaya Maza treasure]. *Kratkiye soobshcheniya o dokladakh i polevykh issledovaniyakh Instituta arkheologii [Brief Issues on Reports and Field Studies of the Institute of Archeology]*, 108, 123–131. (in Russian)
- Chernykh E.N.** (1970) [Ancient metallurgy of the Urals and Volga region]. Moscow, Nauka, 181 p. (in Russian)
- Chernykh E.N.** (2004) [Kargaly, Volume III: settlement of Gorny: technology of mining and metallurgical production: archeobiological research]. Moscow, Yazyki slavyanskoy kultury, 320 p. (in Russian)
- Chernykh E.N., Kuzminykh S.V.** (1989) [Ancient metallurgy of Northern Eurasia: Seima-Turbino phenomenon]. Moscow, Nauka, 320 p. (in Russian)
- Degtyareva A.D.** (2009) [Chemical and metallurgical metal groups of Sintashta culture]. *Vestnik arkheologii, antropologii i etnografii [Bulletin of Archeology, Anthropology and Ethnography]*, 11, 29–41. (in Russian)
- Degtyareva A.D.** (2010) [History of the Bronze Age metal production in Southern Transurals]. Novosibirsk, Nauka, 162 p. (in Russian)
- Degtyareva A.D., Kuzminykh S.V., Orlovskaya L.B.** (2001) [Metal production of Petrovka tribes based on materials from the settlement of Kulevchi 3]. *Vestnik arkheologii, antropologii i etnografii [Bulletin of Archeology, Anthropology and Ethnography]*, 3, 23–54. (in Russian)
- Degtyareva A.D., Vinogradov N.B., Kuzminykh S.V., Rassomakhin M.A.** (2019) [Metal objects of Alekseevskaya-Sargara culture of Central and Upper Tobol region]. *Vestnik arkheologii, antropologii i etnografii [Bulletin of Archeology, Anthropology and Ethnography]*, 47 (4), 28–44. (in Russian)
- Grigoryev S.A.** (2013) [Bronze Age metallurgical production in Northern Eurasia]. Chelyabinsk, Tsitsero, 660 p. (in Russian)
- Korochkova O.N., Stefanov V.I., Spiridonov I.A.** (2020) [Sanctuary of first metallurgists of Central Urals]. Yekaterinburg, UrFU, 214 p. (in Russian)
- Kuzminykh S.V.** (2021) [Historical and metallurgical research: searches, problems, solutions]. *Analiticheskiye issledovaniya laboratorii yestestvennonauchnykh metodov. Vyp. 5. [Analytical Studies of the Laboratory of Natural Science Methods. Issue 5]*. Moscow, Institut archeologii RAN, 53–77. (in Russian)
- Vikent'ev I.V., Eremin N.I., Belogub E.V., Moloshag V.P.** (2019) [Selenium in volcanogenic massive sulfide ores]. *Doklady Earth Sciences*, **484**(1), 40–44.
- Vinogradov N.B., Berseneva N.A., Alaeva I.P., Alent'ev Yu.M., Blinov I.A., Galibin V.A., Epimakhov A.V., Ilyushina V.V., Kitov E.P., Kosintsev P.A., Rassomakhin M.A.** (2020) [Kulevchi VI – a Late Bronze Age burial ground in Southern Transurals]. Chelyabinsk, YUURGGPU, 556 p. (in Russian)
- Vinogradov N.B., Degtyareva A.D., Kuzminykh S.V., Medvedeva P.S.** (2017) [Images of the era. The Bronze Age Krivoye Ozero burial ground in Southern Transurals]. Chelyabinsk, Abris, 400 p. (in Russian)
- Zaykov V.V., Yuminov A.M., Dunaev A.Yu., Zdanovich G.B., Grigoriev S.A.** (2005) [Geological and mineralogical studies of ancient copper mines in the Southern Urals]. *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii [Archeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia]*, 24(4), 101–115. (in Russian)