

ИЗУЧЕНИЕ СЕРЕБРЯНЫХ ИЗДЕЛИЙ БОРОДИНСКОГО КЛАДА: НОВОЕ ОБ ИЗВЕСТНОМ

П. Хоммель, П. Брай, В.А. Хвостиков, В.К. Карандашев, А.Ю. Лобода,
А.С. Колчина, Н.И. Шишлина

Бородинский клад является одной из самых известных коллекций позднего бронзового века Евразии, результатом процветания многокомпонентной системы связей на рубежа III – II тыс. до н.э. В его состав входят 17 предметов, среди которых четыре артефакты из серебряных сплавов — два целых наконечника копья, втулка третьего наконечника копья и кинжал. Все эти предметы покрыты золотой фольгой и, на первый взгляд, представляются последовательным набором. Однако их типологические специфики рассказывают другую историю. Как отметил Е. Н. Черных более 50 лет назад, из этой группы выделяется одно из наконечников копья, с вильчатый стержень поразительно похожий на материале другую знаменитую сборку бронзового века — Турбинский могильник на западном Урале (Черных, 1965). Другие исследователи предложили еще более широкие связи, простирающиеся в направлении Западной Европы, Анатолии и Средиземноморья (Бочкарев 1968; Штерн 1914; Кривцова-Гракова 1949; Gimbutas 1957; Kaiser 1997 Tallgren 1926).

Основная задача текущих исследований — точное определение химического и изотопного состава серебряных изделий Бородинского клада. Главная цель дальнейшей интерпретации полученных результатов — выявить сходство и различия в характеристиках этих серебряных сплавов, отобрать соответствующие технические биографии и определить, в какой степени они связаны друг с другом.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ, ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В предыдущих исследованиях уже были получены аналитические данные о составе серебряных сплавов изделий Бородинского клада (Черных, 1965; 1978; Черных, Кузьминых, 1989), но из-за ограниченных возможностей существующих в то время методов анализа исследователи могли получить только полуколичественные результаты.

Новые масс-спектральные данные об элементном составе сплавов серебра, использованных при изготовлении артефактов Бородинского клада, полученные высокочувствительными многоэлементными методами атомной эмиссии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, (ИСП-АЭС и ИСП-МС) в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (АСИЦ ИПТМ РАН), дополненные данными по изотопному составу свинца полученными в NERC Isotope Geosciences Laboratory (British Geological Survey) (Ноттингем, Великобритания), позволяют вернуться к обсуждению характеристики металлов клада.

Рис. 1. Silver alloy items considered in the current study (a) and their distribution (b)—1–4 Бородинский Клад; 5–11 Турбинский Могилник; 12 Donskoj; 13 Temrta; 14 Mandjikini

Для сопоставления были отобраны микропробы из серебряных изделий причерноморских, степных, и приуральских памятников бронзового века (рис.1а–б).

МЕТОДОЛОГИЯ ОПИСАНИЯ И ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Подход к описанию и интерпретации результатов анализа в данном исследовании отличается по ряду аспектов от традиционных подходов к исследованию состав древних металлов как в обработке данных, так и в концептуальной структуре, в которой они интерпретируются.

Хотя в большинстве исследований древнего металла преобладает вопрос об происхождении металлических предметов, в данном подходе это второстепенным вопросом, возможность чего должна быть продемонстрирована, а не предположена с самого начала.

Причина довольно проста, но ее последствия являются значительные. Способность переплавлять и переделывать металл является одним из самых характерных свойств этих материалов. В тот процесс бывает значительных химических изменений во время последовательных циклов производства— в результате окислительной потери при расплавлении или сегрегации во время литья— но также и смешивание металла из нескольких источников или сочетание разных металлов в одном сплаве.

Из-за этого, невозможно используем многомерную статистику для автоматической группировки данных. Также не полагаться на прямые корреляции между элементами, поскольку они не всегда нормально распределены. Технологические выборы литейщики могут (и часто) оказывают на составе и этих подходах не дает возможность разделить и изучать этих выборов.

Альтернативный подход был впервые использован в ходе реализации проекта FLAME (Flow of Ancient Metals across Eurasia/Поток древних металлов через Евразию). Основой подхода является универсальное систематическое охарактеризование химического состава древних металлических предметов с помощью «присутствие / отсутствие» ряда диагностических элементов (как основных, так и следовых). Дальнейшие

интерпретация объединяет археологическую информацию и химическом характере металлов в общей модели которой позволяет исследовать их сходство в различных масштабах, от отдельных объектов до географических регионов.

При изучении медных сплавов, такого подход уже оказался успешным (FLAME REFERENCES), но многокомпонентность и взаимосвязанность систем 'Ag' сложнее и требуют разработки специального подхода.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ

Серебро и серебряные сплавы

Первая сложность, которая возникает при классификации серебряных изделий, – идентификация легированных искусственных примесей. Это напрямую связано с изучением **меди (Cu)** и ее лигатур, поскольку известно, что в древности медь часто добавляли к серебру, – либо чтобы сплав стал более прочным, либо для изменения цвета, а также для изготовления большего количества предметов из более редких благородных металлов (Tylecote, 1987).

При добавлении **меди** в сплав могут попасть в небольшом количестве и другие элементы, которые часто встречаются с медной рудой в природе: **мышьяк (As)**, **сурьма (Sb)** и **никель (Ni)**. Некоторые из этих элементов также могут быть естественным связаны с серебром. Поэтому мы выбираем отсечки для этих элементов пропорционально их вероятным соотношениям в медных сплавах. Там, где они присутствуют в отсутствие значительного количества меди, мы должны рассматривать их с осторожностью. **Серебро (Ag)** тоже нередко встречается в медной руде, но, конечно, разделить следовые примеси серебра на фоне серебряных сплавов невозможно.

Поскольку литейщики в древности могли добавлять в серебро не только чистую медь, но и искусственные бронзовые сплавы мы также должны обратить внимание на элементы как **олово (Sn)**, **цинк (Zn)** и **свинец (Pb)**. Однако, что касается свинца, надо помнить, что одним из главных технологических методов производства серебра в древности было купелирование, или окисление серебросодержащего галенита (свинцовой руды). Поэтому, где возможно продемонстрировать что присутствие свинца (Pb) в сплаве не связано с добавлением бронзы, может рассматриваться свинец как следовой индикатор этого технологического процесса.

К сожалению, отсутствие свинца в каком-либо конкретном предмете не обязательно указывает на другой способ производства - эксперименты показали, что в определенных условиях свинец может быть полностью удален из серебра путем окисления (L'Héritier *et al.*, 2015).

С точки зрения геологического происхождения серебра, золота (Au) и металлов платиновой группы – **платины (Pt)**, **палладия (Pd)**, **осмия (Os)**, **иридия (Ir)**, **родия (Rh)**, и **рутения (Ru)**, часто обсуждаются определенные источники серебра (Ogden, 1977; Tylecote, 1987). Они не связаны ни с медью, ни с преднамеренным добавлением в сплав, и поскольку процесс окисления на эти благородные металлы не влияет, присутствие или отсутствие их в сплавах не связано с технологическими процессами. Хотя важно отметить, что естественные распределения этих платиноидов пока недостаточно изучены, и результаты объемного химического анализа платиноидов не обеспечивают надежной разделение конкретных источников (см. Зайков и др. 2016; Wood *et al.* 2017), их присутствие или отсутствие, тем не менее, дает общее представление об основных геологических характер источников серебра.

Таким образом, все перечисленные диагностические элементы были рассмотрены в настоящем исследовании серебряных предметов из Бородинского клада и серебряных предметов из других комплексов бронзового века Евразии:

- использовалась величина отсечения для **меди (Cu)** в серебре 1%; медь рассматривалась вместе с **оловом (Sn)** и **цинком (Zn)** при величине отсечения 0,1% и **мышьяком (As)**, **сурьмой (Sb)** и **никелем (Ni)** при величине отсечения 0,01%;

- для **золото (Au)** и **свинцом (Pb)** в серебре использовалась величина отсечения 0,1% и для **металлами платиновой группы (Pt*, Pd*, Os, Ir, Rh, Ru)** 0,0001% (*отмечены те металлы платиновой группы, содержание которых было достаточно высоким и следовые примеси которых использовались в данном исследовании). Важно отметить, что результаты для осмия и родия оценивались аналитиками только как «информационные данные» (Карандашев и др. 2019).

Каждое из первичных величина отсечения (n) было сопряжено с более низким вторичным величина отсечения ($n / 2$), чтобы лучше отражать вариабильность материала.

Там, где мы могли достоверно идентифицировать преднамеренное добавление меди/бронзы в качестве легирующего компонента, мы также вычисляли приблизительную «реконструкцию» состава добавленного металла. С некоторой осторожностью можно сравнить состав таких «медных сплавов в серебре» с эталонными массивами данных по химии медных сплавов (Черных, 1966; 1970). Таким образом, имея эти данные, можно начать связывать металлургические системы серебра и меди.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При классификации использовались результаты анализа изделий из серебра и серебряных сплавов Бородинского клада и сопоставительной выборки.

Таблица 1(бывши 8). Бородинский клад. Основной состав серебряных сплавов изделий Бородинского клада

При рассмотрении результатов анализа серебряных изделий Бородинского клада можно определить различия в исходном рудном источнике, возможно, в способах производства (выплавки) серебра, а также в технологическом процессе сплавления серебра с медью и бронзой.

Таблица 2 Chemical Characteristics of the Бородинский клад:

а – присутствие/отсутствие золота (Au), платины (Pt) и палладия (Pd) вместе со свинцом (Pb) в элементном составе серебряных изделий. Темно-коричневые колонки показывают абсолютное содержание золота (Au) в интервале 0–0,5% и свинца (Pb) в интервале 0–0,15%;

б – присутствие/отсутствие меди (Cu) и других сопутствующих элементов в элементном составе серебряных изделий. Темно-коричневые колонки показывают абсолютное содержание меди (Cu) в интервале 0–40 %

в - примерный состав меди/медных сплавов в составе серебряных изделий. Результаты рассчитаны путем повторной нормализации аналитических данных для оценки исходных концентраций различных элементов (As, Sb, Ni, Sn) в меди/медных сплавах, добавленных к серебру

Величина отсечения для присутствия/отсутствия элементов в легенде таблицы.

Что касается собственно серебра, из которого сделаны предметы Бородинского клада, то по составу можно сразу отделить наконечник копья 1, втулку копья 3 (A135/1 и A135/12) и кинжал (A135/3) от вильчатого наконечника копья 2 (A135/2) на основании присутствия следы золота и элементов платиновой группы (табл. 2а).

Присутствие или отсутствие элементов платиновой группы и золота потенциально позволяет дифференцировать широкие типы источника серебра (независимо от техника извлечения серебра, поскольку их практически невозможно удалить из сплава с помощью доступных технических процессов). Хотя их отсутствие в наконечнике копья 2 предполагает, что по крайней мере один из предметов в Бородинского кладе имел совершенно другое происхождение, их присутствие в других серебряных предметах кладе само по себе не позволяет нам прямо утверждать, что эти изделий имеют общий источник. К счастью, есть и другие следы, которые могут далее осветим этот вопрос.

Присутствие свинца (в концентрациях, более или менее коррелирующих с золотом) может указывать на общий метод производства, именно купелирование - очистку серебра от свинцовых руд путем окисления. Это технический предложение интересно, но требует дальнейшего изучения. Важно отметить что этот элемент (Pb) также отсутствует в составе наконечнике копья 2.

Предметы Бородинского клада также разделяются на основе технологии литейщиков, применяемой в производстве этих артефактов (табл. 9–11). Понятно, что в серебре, использованном для изготовления наконечника копья 1 (A135/1), нет никаких примесных добавок.

Содержание серебра в копье составляет 99,7%, присутствуют только следовые примеси меди (Cu – 0,26%), золота (Au – 0,15%) и свинца (Pb – 0,069%).

Состав копья 2 (A135/2) также отличен от состава других сплавов. Он изготовлен из серебра с легированной мышьяковой медью (CuAs), содержание которой в сплаве около 30% (табл. 10).

Копье 3 (втулка) (A135/12) и кинжал (A135/3) были выплавлены из серебра с легированной примесью мышьяковой оловянной бронзы; в составе сплава втулки копья 3 – незначительные следы никеля (табл. 9–11). Добавление меди в серебро – обычная практика, поскольку в этом случае металл становится тверже; тем не менее это приводит к изменению цвета металла. По всей вероятности, при добавлении в сплав бронзы изменение цвета гораздо менее заметно.

При более широком анализе данных по серебряным сплавам изделий Бородинского клада и предметов сопоставительной выборки выявлены интересные тенденции (табл.12).

Таблица 3. Основной состав, микропримеси и следовые примеси серебряных сплавов изделий сопоставительной выборки: Приуралье, Восточно-Европейская степь и Северный Кавказ

Содержание следовых элементов в серебряном сплаве копья 2 Бородинского клада (A135/2) соотносится с составом серебряных артефактов из могильника Турбинский в Приуралье, где такие предметы изготовлены из сплава серебра с медью (CuAs/CuAsNi/CuNi)—включая кельт из Турбинского могильника (A1664/13), который фактически изготовлен из сплава меди и серебра Cu–Ag (медь составляет 67,5%). В составе проанализированных серебряных артефактов из Турбинского

могильника также отсутствуют примеси золота, металлов платиновой группы и свинца (табл. 13).

Серебряная руда встречается редко, но было давно предположено, что некоторые месторождения меди (например, Никольское в Южном Приуралье) отличаются заметным содержанием серебра в руде (Черных, 1970. С. 42). Дополнительные исследования подтвердили, что на рудных полях в Уральские вулканогенных толщах карбонового возраста несколько известны месторождения серебрясодержащих медных руд (Зайков и др., 2016. С.237). Хотя уровень содержания серебра в этих медных рудах (от 0,001 до 1%) очень важен при обсуждении серебрясодержащей меди ($Ag \leq 0,7\%$), распределенной в уральском среднем - позднем бронзовом веке (Черных, 1970; Черных, Кузьминных 1989), пока трудно понять, как такие источники могли использоваться для первичной выплавки серебра в древности. Техника ликвации, которая позволила эксплуатировать такие руды, была изобретена только в позднем средневековье (Agricola 1912).

Е.Н. Черных и С.В. Кузьминных (1989, 172) предполагают, что в древности Никольские руды могли быть более разнообразными (т.е. что они позволяло выплавлять металл с широким спектром составов от меди до серебра). Это конечно возможно, но не можно объяснить значительного содержание мышьяка в сплавах, элемент который практически отсутствует в Никольском руде (хотя известен в близлежащих месторождениях в Таш Казгане).

Таблица 3b (13). Бородинский клад и сопоставительная выборка серебряных изделий из памятников эпохи бронзы Северной Евразии: присутствие/отсутствие золота (Au), наиболее часто встречаемых элементов платиновой группы – палладия, платины (Pd, Pt) и свинца (Pb);

Темно-коричневые колонки показывают абсолютное содержание золота (Au) в интервале 0–0,5% и свинца (Pb) в интервале 0–0,15%

Черных (1970) также рассматривает возможность использования месторождений самородного серебра либо в Никольском, либо в других местах на Урале. Использование самородного серебра может объяснить низкую долю свинца в всех серебряных изделиях из Турбино и, соответственно, в составе копия 2 Бородинского клада. На основании текущих данных, мы считаем, что преднамеренное смешивание самородного серебра и разнородной выплавленной меди представляется более правдоподобным объяснением характеристик этих данных.

Таблица 4: Бородинский клад и сопоставительная выборка серебряных изделий из памятников эпохи бронзы Северной Евразии: а – присутствие/отсутствие золота (Au), платины (Pt) и палладия (Pd) вместе со свинцом (Pb) в элементном составе серебряных изделий. Темно-коричневые колонки показывают абсолютное содержание золота (Au) в интервале 0–0,5% и свинца (Pb) в интервале 0–0,15%;

б – присутствие/отсутствие меди (Cu) и других сопутствующих элементов в элементном составе серебряных изделий. Темно-коричневые колонки показывают абсолютное содержание меди (Cu) в интервале 0–40 %

в - примерный состав меди/медных сплавов в составе серебряных изделий. Результаты рассчитаны путем повторной нормализации аналитических данных для оценки исходных концентраций различных элементов (As, Sb, Ni, Sn) в меди/медных сплавах, добавленных к серебру

Намеренное добавление CuAs в чистом серебре (без примесей золота, металлов платиновой группы и свинца) также фиксируется в образцах изделий из нижнедонских степей (хутор Донской, А1072/1), которые датируются III тыс. до н. э. (табл. 13–14). Однако химический состав находок из чистого серебра из могильников Темрта и Манджикины в Прикаспии и Нижнем Подонье, относимых к тому же III тыс. до н. э., также характеризуется повышенным содержанием золота, свинца, а в кольце из Манджикин – палладия. Таким образом, состав серебра, из которого изготовлены три предмета Бородинского клада: копье 1, кинжал и втулка копья 3 (А135/1, 3 и 12) близок к составу серебряных изделий из степной зоны юга Восточной Европы, что свидетельствует о схожей технике производства серебряных сплавов.

Кроме Бородинского комплекса, легированное оловянной бронзой серебро, которое определено в составе втулки копья 3 и кинжала, не зафиксировано ни в одном другом образце серебра проанализированы в ходе данного исследования.

Особенно интересно отметить, что добавление оловянной бронзы к серебру не обнаружено в серебряных изделиях Турбинского могильника, несмотря на относительно высокие пропорции (>20% от сборки) оловянной бронзы в изделий из этого же памятника (Черных, 1970). Возможно что отсутствие олова может также отражать осознанный выбор, вытекающий из того, что оловянная бронза также считалось драгоценным металлом в это время, обработанно только с осторожностью.

Определение вариаций изотопного состава свинца в серебряных изделиях

Основная цель исследования изотопного состава Pb в изделиях из серебряного сплава Бородинского клада – сравнение изотопных соотношений свинца и последующее сопоставление результатов с

аналогичными данными, полученными для серебряных изделий сопоставительной выборки – из могильников Турбинский сейминско-турбинской культуры и Темрта – катакомбной культуры. Сравнение с изотопными соотношениями свинца в изделиях из Турбинского могильника особенно важно, поскольку ранее высказывалось предположение, что по крайней мере одно из копий Бородинского клада с вильчатым стержнем (А135/2) и серебряные изделия этого могильника сделаны из металла одного и того же месторождения (Черных, 1965; 1970).

Полученные изотопные соотношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ в изученных изделиях представлены в таблице 17 и на диаграммах изотопного состава Pb на рисунке 9.

Таблица 5. Изотопный состав свинца в предметах из Бородинского клада (БК), а также из могильников Турбинский (Тр) и Темрта (Т)

Рис. 3. Изотопный состав свинца $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ в предметах из Бородинского клада, а также из могильников Турбинский и Темрта

На диаграмме видно, что (кроме копья с вильчатая стержен) изотопный состав серебряных изделиях из Бородинского клада (Копье 1, кинжал, А135/3 и втулка, А135/12) образуют единую группу.

Копье 2 вычерчивает близко к трем из серебряным предметам Турбинского могильник (копья, А1664/2) 209 и браслеты, А1664/193, 204, 194). Различия в других предметы Турбинского могильника, могут объяснять, как результате относительно низких уровней содержания свинца в серебряных сплавах и последующего влияния следовых добавок свинца (из добавленной меди или других неизвестных источники загрязнения).

Соответствующее отсутствие вариации в изотопном составе материала из Бородино, несмотря на различное содержание меди в проанализированных образцах серебряных изделий Бородинского клада, согласованность изотопного состава свинца трех объектов клада очень интересна. Во-первых, поскольку тех артефакты включает и чистая серебро, и серебра сплавано с бронзой, она указывает, что в данных объектах свинец, скорее всего, связанно с серебром и подтверждает вывода на изготовление серебра технологией купелирования. Во-вторых, это говорит о том, что серебро, использованное для производства исследуемых объектов, происходило из источника/источников с похожим изотопным составом свинца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении серебряных изделий Бородинского клада выделены элементы, наиболее часто ассоциируемые с медью и бронзой в древних предметах из металла, и изучены их соотношения. Удалось показать, с высокой долей вероятности, что медь (и бронза) добавлялись к серебру во многих случаях – по-видимому, для получения более прочного сплава и изменения его цвета. Обычная связь между медью и мышьяком (и отчасти никелем) в наших реконструкциях сплавов с добавлением меди соотносится с предметами, изготовленными из сплавов с содержанием меди.

Сплавление металлов четко идентифицировано в двух предметах Бородинского клада – кинжале и втулке копья 3 (A135/3 и 12), при изготовлении которых в металл добавили оловянную бронзу. Наличие предметов с высоким содержанием оловянной бронзы подтверждает данный вывод. Что касается содержания серебра в таких сплавах, мы смогли связать кинжал и втулку копья 3 с наконечником копья 1 из чистого серебра (A135/1). Во всех перечисленных предметах выявлено

относительно высокое содержание свинца, золота и металлов платиновой группы. Наличие этих элементов в составе серебра ассоциируется с процессом выделения серебра из серебросодержащего галенита путем купелирования. Метод купелирования фиксируется в более ранний период в Передней Азии (Tylecote, 1987); кроме того, по результатам проведенного анализа этот метод применялся при изготовлении ряда серебряных предметов катакомбной культуры (A2035/19 и A2281/43). Вильчатое копьё 2 (A135/2), по-видимому, связано с другим источником серебра (самородное серебро). В его составе не зафиксировано значительного содержания ни золота, ни металлов платиновой группы, ни свинца; оно изготовлено из сплава серебра и мышьяковой меди, а не оловянной бронзы. Рассмотрение сопоставительной выборки в рамках настоящего исследования позволяет лучше понять различия в производственных процессах химии металла на примере Бородинского клада.

В соответствии с данными проведенного анализа серебряных предметов из Турбинского могильника, химический состав всех предметов аналогичный: серебро без включений свинца, золота и металлов платиновой группы, но с добавлением меди, что соответствует современному составу медных предметов (с включением мышьяка). Сходные характеристики вильчатого копья 2 (A135/2) Бородинского клада и серебряных изделий Турбинского могильника подтверждают предположение о связи между этим комплексом. При этом совершенно очевидно, что на такую связь указывает только один предмет, а не весь клад (рис.9). Это открытие позволяет в будущем вернуться к вопросам о материале, из которого изготовлены предметы.

При изготовлении копья 1, кинжала и втулки копья 3 к серебру, полученному методом купелирования, состав которого надежно увязывается с чистым серебром копья 1, была добавлена мышьяковая медь, предварительно смешанная с оловом. Можно сказать, что эти предметы

клада имеют общую производственную «биографию», вероятно, связанную с металлургическими традициями степной зоны юга Восточной Европы или, возможно, регионов, расположенных южнее.

Биография вильчатого копья 2 в составе комплекса спрятанных вещей другая. Оно изготовлено из серебра, происходящего из совершенно другого источника и выплавленного, вероятно, по иной технологии. Таким образом, по своей типологии и химическому составу металла это копьё, вероятно, можно связать с серебряными предметами из Турбинского могильника на Урале, при анализе которых прослеживается единая технологическая схема: при производстве различных предметов к серебру (потенциально, самородному) добавлялась медь – CuAs, CuAsNi(?), CuNi(?). Хотя биография копья 2 и реконструируется с учетом результатов предыдущих работ (Черных, 1965; 1970), наше исследование показывает, как на основе тщательного анализа металла можно прийти к выводу, почему присутствуют/отсутствуют те или иные элементы в его составе.

ПРИМЕЧАНИЕ. Постановка проблемы, отбор образцов, проведение масс-спектрометрических измерений, анализ исторического контекста проводился в рамках гранта РФФИ, № 17-18-01399. Аналитическая часть исследования проведена при поддержке Европейского совета по научным исследованиям (ERC), в рамках исследовательской программы Европейского союза Horizon 2020, в рамках гранта 670010 FLAME («Flow of Ancient Metals across Eurasia: (Поток древних металлов через Евразию).

Бадер О.Н., 1959. Новые раскопки Турбинского I могильника // Отчеты Камской (Воткинской) экспедиции института археологии АН СССР. Вып.1./ Отв. ред. С.В. Киселев. М.: ИА АН СССР, 63–84.

Бадер О.Н., 1964. Древнейшие металлурги Приуралья. М.: Наука.

Братченко С.Н., 2001. Донецька катакомбна культура раннього етапу. Частина 1. Луганськ: Шлях.

Зайков В.В., Таиров А.Д., Зайкова Е.В., Юминов А.М., Котляров В.А., 2016. Благородные металлы в рудах и древних золотых изделиях Центральной Евразии. Челябинск: Каменный пояс.

Черных Е.Н., 1965. Результаты изучения химического состава металла Бессарабского клада // *Российская археология*, 1, 270–272.

Черных Е.Н., 1966. История древнейшей металлургии Восточной Европы. М.: Наука.

Черных Е.Н., 1970. Древнейшая металлургия Урала и СССР. М.: Наука.

Черных Е.Н., 1976. Древняя металлообработка на Юго-Западе СССР. М.: Наука.

Черных Е. Н., 1978. Горное дело и металлургия в древнейшей Болгарии. София: Изд-во Болгарской Академии наук.

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

Чугаев, Чернышев, 2012. Источники поступления серебра для изделий из погребений ранних кочевников Южного Приуралья по результатам изучения изотопного состава Pb высокоточным методом MC-ISP-MSA // *Влияния ахеменидской культуры в Южном Приуралье (V–III вв. до н. э.)* / Отв. ред. М.Ю. Трейстер, Л.Т. Яблонский. М.: Таус, 239–245.

Agricola, A. 1912. De Re Metallica. Trans. H.C. Hoover and L.H. Hoover. London: The Mining Magazine.

Beck L., Bosonnet S., Réveillon S., Eliot D., and Pilon F., 2004. Silver surface enrichment of silver-copper alloys: a limitation for the analysis of ancient silver coins by surface techniques // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. N.226. P.153–162.

Bray P.J. and Pollard A.M., 2012. A new interpretative approach to the chemistry of copper-alloy objects: source, recycling and technology // *Antiquity*. Vol. 86. P. 853–867.

Bray P., Cuénod A., Gosden C., Hommel P., Liu R. and Pollard A.M., 2015. Form and flow: the ‘karmic cycle’ of copper // *Journal of Archaeological Science*. Vol. 56. P. 202–209.

Budd P., Pollard A.M., Scaife B., and Thomas R.G., 1995. The possible fractionation of lead isotopes in ancient metallurgical processes // *Archaeometry*. Vol. 37. P. 143–150.

Budd P., Haggerty R., Pollard A.M., Scaife B., and Thomas, R.G., 1996. Rethinking the quest for provenance // *Antiquity*. Vol. 70. P. 168–174.

Chapman R.J., Leake R.C., Warner R.A., Cahill M.C., Mles N.R., Shell C.A., and Taylor J.J., 2006. Microchemical characterisation of natural gold and

artefact gold as a tool for provenancing prehistoric gold artefacts: A case study in Ireland // *Applied Geochemistry*. Vol. 21. P.904–918.

Cristea-Stan D., Constantinescu B., 2016. Prehistoric gold metallurgy in Transylvania – an archaeometrical study // *Networks of trade in raw materials and technological innovations in Prehistory. An archaeometry approach*. Oxford: Archaeopress Publishing Ltd. P. 27–38.

Cuénod A., Bray P. and Pollard A.M., 2015. The ‘tin problem’ in the Near East – further insights from a study of chemical datasets on copper alloys from Iran and Mesopotamia // *Iran*. Vol. LIII. P. 29–48.

Gale N.H., 1989. Lead isotopes applied to provenance studies – a brief review // Y. Maniatis (ed.) *Archaeometry. Proceedings of the 25th International Symposium*. Amsterdam: Elsevier.

Gale N.H., 2003. Disciplinary fault lines: science and social archaeology – another view // *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*. № 3. P. 55–62.

Gale N., Stos-Gale Z., 1996. Lead isotope methodology: the possible fractionation of lead isotope compositions during metallurgical processes // S. Demirci, A.M. Özer and G. D. Summers (eds.) *Archaeometry 1994*. Ankara: Tübitak.

Hartmann A., 1970. Prähistorische Gold funde aus Europa; spectral analytische Untersuchungen und deren Auswertung // *Studien zu den Anfängen der Metallurgie*. № 3. Berlin: Gebr. Mann.

Hartmann A., 1982. Prähistorische Gold funde aus Europa; spectral analytische Untersuchungen und deren Auswertung // *Studien zu den Anfängen der Metallurgie*. № 5. Berlin: Gebr. Mann.

Hsu Y.-K., Bray P.J., Hommel P., Pollard A.M. and Rawson J., 2016. Tracing the flows of copper and copper alloys in the Early Iron Age societies of the eastern Eurasian steppe // *Antiquity*. Vol. 90. P. 357–375.

Jansen M., Aulbach S., Hauptmann A., Höfer H.E., Klein S., Krüger M., and Zettler R.L., 2016. Platinum group placer minerals in ancient gold artefacts – Geochemistry and osmium isotopes of inclusions in Early Bronze Age gold from Ur / Mesopotamia // *Journal of Archaeological Science*. Vol. 68. P. 12–23.

Jones R.S. and Fleischer M., 1969. Gold in Minerals and the Composition of Native Gold. U.S Department of the Interior. Geological Survey Circular 612. Washington.

Junghans S., Sangmeister E. and Schröder M., 1960. Metallanalysen kupferzeitlicher und frühbronzezeitlicher Bodenfunde aus Europa // *Studien zu den Anfängen der Metallurgie*. Vol. 1. Berlin: Gebr. Mann.

Junghans S., Sangmeister E. and Schröder M., 1968. Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas // *Studien zu den Anfängen der Metallurgie*. Vol. 2. Berlin: Gebr. Mann.

Knapp A.B., 2002. Disciplinary fault lines: Science and social archaeology // Mediterranean Archaeology and Archaeometry. Vol. 2. P. 37–44.

L' Héritier M., Baron S., Cassayre L. and Téreygeol F., 2015. Bismuth behaviour during ancient processes of silver-lead production // Journal of Archaeological Science. Vol. 57 P. 56–68.

Liu R., Bray P. J., Pollard A. M. and Hommel P. N., 2015. Chemical analysis of ancient Chinese copper-based objects: Past, present and future // Archaeological Research in Asia. Vol.3. P.1–8.

McKerrell H. and Tylecote R. F., 1972. The working of copper-arsenic alloys in the Early Bronze Age and the effect on the determination of provenance // The Proceedings of the Prehistoric Society. Vol. 38. P. 209–218.

Ogden J. M., 1977. Platinum Group metal inclusions in Ancient Gold Antiquities // Journal of the Historical Metallurgy Society, № 11. P. 53–72.

Perucchetti L., 2017. Physical barriers, cultural connections: A reconsideration of the metal flow at the beginning of the Metal Age in the Alps. Archaeopress, Oxford.

Pollard A.M., Bray P., Hommel P., Hsu Y.-K., Liu R. and Rawson J., 2017.

Bronze Age metal circulation in China // Antiquity. Vol. 91. P. 674–687.

Pollard A.M., Rawson J. and Liu R., 2018. Some recently rediscovered analyses of Chinese bronzes from Oxford // Archaeometry. Vol. 60. P. 118–127.

Popov H., Jockenhövel A., 2018. The Late Bronze Age goldmine at Ada Tepe // Stefan Alexandrov u.a. (eds.), Gold & Bronze. Metals Technologies and Interregional Contacts in the Eastern Balkans during the Bronze Age. Sofia. P.193–205.

Rohl B., Needham S.P., 1998. The Circulation of Metal in the British Bronze Age: the Application of Lead Isotope Analysis. London: British Museum Occasional Paper 102.

Stöllner T. and Gambashidze I., 2014. The Gold Mine of Sakdrisi and early Mining and Metallurgy in Transcaucasus and the Kura-Valley System // Problems of Early Metal Age Archaeology of Caucasus and Anatolia. Tblisi. P. 101–124.

Trifonov V.A., Shishlina N.I., Loboda A. Yu., Kolobykina N.N., Tereshenko E.Yu., Yatsishina E.B., 2018. The production of thin-walled jointless gold beads from the Maykop culture megalithic tomb of the Early Bronze Age at Tsarskaya in the North Caucasus: results of analytical and experimental research// Archaeometry. doi: 10.1111/arc.12393.

Tylecote R. F., 1987. The Early History of Metallurgy in Europe. London: Longmans.

Wood J. R., Charlton M. F., Murillo-Barroso M. and Martín-Torres, M., 2017. Iridium to provenance ancient silver // Journal of Archaeological Science. Vol. 81. P. 1–12.

