

С. В. Богданов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ПАСТУШЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕТАЛЛОПРОИЗВОДСТВА БРОНЗОВОГО ВЕКА СТЕПНЫХ РЕГИОНОВ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ*

doi: 10.30759/1728-9718-2020-4(69)-6-14

УДК 902(415)“637”

ББК 63.4(0)

В эпоху бронзы с IV по II тыс. до н. э. в степях Северной Евразии реализовывалась оригинальная модель металлопроизводства, отличавшаяся особенностями природно-климатической, территориальной, хозяйственно-культурной (скотоводческой) системы организации производства, спецификой подготовки рудных материалов к плавке пиротехническим (обогащительный и рафинирующий пожог при температурах до 1000°C) и химическим (окисление поташем) путями, способом восстановления меди в отражательных печах с сегрегацией выплавляемых материалов на пироксеновый или оливиновый шлаковый короб сверху и цельный лепешкообразный слиток черновой восстановленной меди (93–98 % Cu; 0,5–2 % Fe; 0,5–1,5 % S и др.) на дне печи в изложнице. Различные фазы горно-металлургического производства носили выраженный сезонный характер и отчетливо коррелировались со скотоводческими циклами. В степях Северной Евразии различные варианты пастушеской модели просуществовали несколько тысячелетий, объединяя две крупнейшие металлопроизводственные системы Старого Света — Циркумпонтийскую металлургическую провинцию (ЦМП) и Евразийскую (Европейско-Азиатскую) металлургическую провинцию (ЕАМП). Финальные фазы производства металлических орудий, связанные с литьем и кузнечной обработкой изделий, существенно различались в отдельных культурах, но ключевые технологические алгоритмы производства меди на протяжении эпохи раннего металла эволюционировали несущественно. Металлургический бум в степях Северной Евразии, связанный с деятельностью горняков-металлургов срубной и алакульской культур позднего бронзового века, исчерпавший доступные запасы традиционных для IV–II тыс. до н. э. источников сырья — сульфидных руд (халькозин и другие минералы) в медистых сланцах и кремнекарбонатных руд (хризоколла и другие минералы) в медистых песчаниках позднепермских отложений, а также вторичных сульфидов «халькозиновых горизонтов» зон вторичного обогащения ультраосновных месторождений — привел к освоению халькопиритового сырья медно-колчеданных месторождений. Переработка халькопиритов на основе технологических алгоритмов сложившейся ранее пастушеской модели горно-металлургического производства в конце бронзового века во второй половине II тыс. до н. э., помимо вовлечения в пирометаллургический передел практически неисчерпаемого ресурса медного сырья, приводит к получению в металлургических печах побочного продукта — железа и кричных шлаков. Теоретические положения, излагаемые в статье, верифицированы археологическими материалами, данными естественнонаучных анализов, а также серией успешных археометаллургических экспериментов 2018–2020 гг.

Ключевые слова: *степи Северной Евразии, бронзовый век, пастушеская модель металлопроизводства, рудный протолит, обогащение и рафинирование рудных концентратов, пиротехническое восстановление меди, литье и кузнечная обработка изделий*

Введение

С 2016 г. археологами Института степи ОФИЦ УрО РАН, геологами и геохимиками

*Богданов Сергей Вячеславович — к.и.н., доцент, в.н.с., Институт степи ОФИЦ УрО РАН (г. Оренбург)
E-mail: bogdanov-step@yandex.ru*

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект № 18-00-00031 КОМФИ «Фундаментальные и экспериментальные археометаллургические исследования традиционных технологий Приуральского горно-металлургического центра эпохи бронзы» (рук. С. В. Богданов), госзадания № 04021-2016-0001 «Степи России: экологические основы устойчивого развития, обоснование природоподобных технологий в условиях природных и антропогенных изменений окружающей среды» (рук. А. А. Чибилев)

Института минералогии УрО РАН и другими специалистами в степном Приуралье реализуется археометаллургический проект, направленный на изучение древней металлургии, выявление источников рудного сырья, определение технологических алгоритмов металлопроизводства эпохи бронзы.¹ Методами ИСП-МС,² РФА,³ электронной микроскопии, рентгенофазового анализа удалось установить

¹ См.: Геоархеологическая система исторических медных рудников Приуральского (Каргалинского) степного горно-металлургического центра / Богданов С. В. [и др.] // Геоархеология и археологическая минералогия-2018. Миасс, 2018. С. 121–133.

² Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.

³ Рентгенофлуоресцентный анализ.

химизм нескольких тысяч образцов руд и продуктов пирометаллургического передела от эпохи бронзы вплоть до Нового времени с рудников, поселений и погребальных памятников; начались работы по изучению изотопии свинца и меди рудных материалов и древнего металла.⁴ Реализуемый проект по изучению древней металлургии во многом продолжает и развивает основные направления исследований Каргалинской экспедиции Лаборатории естественнонаучных методов Института археологии РАН под руководством Е. Н. Черных, хотя и базируется на несколько иных, преимущественно геоархеологических и экспериментальных, подходах к изучению горно-металлургических комплексов степного Приуралья.

Теоретические положения, впервые излагаемые в статье, верифицированы большими сериями успешных археометаллургических экспериментов, включая 21 эксперимент по восстановлению меди из сульфидных и карбонатных рудных протолитов одним слитком в изложницах печей разных типов с морфологическими и химико-металлургическими признаками черновой меди и стекловатых пироксен-оливиновых шлаков бронзового века, 50 экспериментов по рафинированию черновой меди, литью и кузнечной обработке орудий.⁵

С гуманитарных позиций большинство технологических алгоритмов добычи, переработки и производства меди представляются парадоксальными. Но металлургия меди-бронзы, включая соответствующие производства бронзового века, регулировалась химико-металлургическими барьерами, она не подчинена гуманитарной логике. Химико-металлургические барьеры невозможно сломать, но можно обойти. Величайшие открытия в сфере древней металлургии совершались всякий раз, когда горнякам-металлургам удавалось обойти эти барьеры. Одно из этих открытий — технология купритных плавков — обусловило взлет энеолитической металлургии в очагах Балкано-Карпатской металлургической провинции (БКМП), другое — сегрегационная плавка с разделением выплавляемых мате-

риалов на шлаковый короб сверху и лепешкообразный слиток внизу — вызвало подъем Урукской и других протоцивилизаций Ближнего Востока, породило цепную реакцию распространения очагов горно-металлургической деятельности в степях Северной Евразии, образовавших ЦМП. Далее в схематичном виде излагаются ключевые технологические алгоритмы производства меди в энеолите — бронзовом веке двух глобальных металлопроизводственных систем Евразии.

Специфика технологий древнеземледельческой модели металлопроизводства

Древнеземледельческая (дунайско-древневосточная) модель металлопроизводства энеолита реализовывалась на протяжении VI–V тыс. до н. э., объединяя БКМП и ближневосточные очаги до территории Ирана и Средней Азии на востоке.⁶ Помимо обособленного промысла по выжиганию древесного угля, задействованного в большинстве технологических операций, модель составляли пять последовательных технологических операций.

Блок технологических операций № 1 включал добычу и пожар кусковых сульфидных, сульфидно-карбонатных, кремнекарбонатных, карбонатно-окисных и других доступных руд с содержанием Cu от 15–20 % и выше. Основу рудного протолита составлял халькозин (Cu₂S). Разрабатывались месторождения окисленных руд различных углеродных эпох типа позднепермских отложений Каргалинских рудников, а также отложения зон окисления и вторичного обогащения разнообразных по генезису офиолитовых месторождений. Пожог, вероятно, осуществлялся с целью декрипитации минерального сырья, высадки нежелательных примесей и обогащения (до 30 % Cu и выше) рудных материалов. Пожог в неглубоких ямах производился в температурных режимах до 900 °C на хворосте и дровах. За пожаром следовала основная сортировка материалов. Только пожар по-настоящему раскрывал качество руды. Необогащенные руды, видимо, не подлежали обмену и не поставлялись в металлургические центры. Обогащенный кусковой рудный концентрат — пиролизит, подготовленный для дальнейшей переработки, — состоял из сульфидной фракции (50–60 %)

⁴ См.: Изотопный анализ свинца в металле бронзового века степного Приуралья и Зауралья / Киселева Д. В. [и др.] // XI Всерос. молодеж. науч. конф. «Минералы: строение, свойства, методы исследования». Екатеринбург, 2020. С. 122–125.

⁵ См.: Богданов С. В. Технологии горно-металлургического производства эпохи раннего металла Северной Евразии с позиций экспериментальной археологии // Феномены культур раннего бронзового века степной и лесостепной полосы Евразии: пути культурного взаимодействия в V–III тыс. до н. э. Оренбург, 2019. С. 161–174.

⁶ См.: Черных Е. Н. Горное дело и металлургия в древнейшей Болгарии. София, 1978; Рындина Н. В. Древнейшее металлообработкающее производство Юго-Восточной Европы. М., 1998.

в минеральных ядрах кусковой руды, а также из смеси сульфатов и оксидов меди в корах: $2\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Cu}_2\text{O}(\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4)$. Мелкие куски замещались оксидами полностью. Вероятно, добычу и обогащение руды осуществляли замкнутые кланы горняков, обособленные не только от основной массы земледельческо-скотоводческого населения, но и от металлургов и литейщиков. Горняки демонстрировали типично древнеземледельческий подход к выработанным карьерам и штольням, оставляя в них металлоемкие орудия перед тем, как рекультивировать горные разработки.⁷ Носители традиций пастушеской модели металлопроизводства эпохи бронзы не практиковали подобных ритуалов.

Блок технологических операций № 2 связан с выжиганием сульфидной фракции обогащенного рудного концентрата в металлургических печах в тиглях, установленных ниже фурменных осей. Перед пожаром концентрат дробился до не крупного зерна размером в 1,5–2 мм. Объем перерабатываемого концентрата в одной печи составлял от 0,2 кг до 2 кг. Основной целью операции являлась максимальная десульфидизация смеси до состояния оксидно-сульфатного концентрата: $\text{Cu}_2\text{O}(\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4) \cdot 2\text{Cu}_2\text{S} + 4\text{O}_2 = 2\text{Cu}_2\text{O}(\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4) + \text{SO}_2$. Выжигание осуществлялось на древесном угле в кислородной атмосфере в температурном режиме от 900 до 1100°C. Лишь предплавленный окислительный режим обеспечивал десульфидизацию пиролита. Технологическая операция требовала высокого уровня профессионального мастерства. Температурный режим регулировался не только объемом подаваемого воздуха, но и минеральными реагентами на основе кальция и кремния. Они засыпались в печь на тигли, если зеленовато-оранжевое пламя выгорающей серы менялось на фиолетовое, свидетельствующее о начале формирования делафоссита. Но даже опытные мастера порой пережигали смесь, получая твердые растворы штейнового борнита — делафоссита — куприта («козлы» — по терминологии Нового времени), непригодные для дальнейших плавов. На Балканах и Ближнем Востоке эпизодически находят тигли с частично расплавленными рудными материалами,⁸ породившие априорную версию о некой «фазе

тигельных плавов» в металлургии энеолита. Существует целый ряд химико-металлургических барьеров, не позволяющих восстанавливать медь из рудных материалов в тиглях. Даже засыпанная в тигель шихты угольную пыль и мелкие угли, сформировать полноценную восстановительную атмосферу невозможно. Кроме того, тигли, способные выдержать восстановительные температуры от 1200 до 1450°C, в энеолитических памятниках отсутствуют. Проведенные автором эксперименты показывают, что указанные температуры выдерживают кварцевые тигли, все остальные варианты каменных (графит и др.) и глиняных огнеупорных тиглей прогорают, растрескиваются или растекаются. Связанные между собой технологические операции блоков № 2–4 сосредотачивались внутри одного клана древних металлургов.

Блок технологических операций № 3 включал плавку в металлургической печи отражательного типа с наклонным (ко дну) положением фурм в середине горнила, на древесных углях, в углеродной атмосфере при температуре около 1200–1300°C. Исходным сырьем служила оксидная в основе пирогенная смесь с небольшим количеством сульфатов, полученная во время технологической операции № 2. Сырье дробилось до состояния мелкого зерна, загружалось в разогретую до 1100–1200°C печь через колошник — устье печи. Плавка проводилась с целью получения купритизированных шлаковых материалов — купритных штейнов: $\text{Cu}_2\text{O}(\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4) + 2\text{CO} = 2\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 + \text{SO}_2$. Выплавленные материалы (шлаково-купритная лепешка) дробились в мелкое зерно и использовались целиком в виде основного источника меди. Качество сырья можно было повысить флотацией.

Блок технологических операций № 4 завершался плавкой на медь в температурном режиме 1200–1300°C в восстановительной углеродной (CO) атмосфере. Основу шихты образовывали штейновые купритные материалы технологической операции № 3 и природные куприты, порядка четверти шихты составляли кремниевый и кальциевый флюсы. Плавка осуществлялась в углеродной атмосфере верхней камеры двухкамерной печи гончарного типа со сменными колосниками из перекрещенных глиняных прутьев. До восстановительных температур печь нагревалась дровами через несколько топок, сходящихся в нижней камере. Древесный уголь, а затем и компоненты шихты (до 2 кг) загружались

⁷ См.: Черных Е. Н. Горное дело и металлургия... С. 68, рис. 46–47.

⁸ См.: Tylecote R. F. A History of metallurgy. London, 1992; Ryndina N., Indenbaum G., Kolosova V. Copper production from polymetallic sulphide ores in the northeastern balkan eneolithic culture // Journal of Archaeological Science. 1999. № 26. P. 1059–1068.

в верхнюю камеру через колошник. Принудительный поддув осуществлялся через топку. Медь из купритов восстанавливалась в виде корольков на колоснике, частично протекала ниже: $2\text{Cu}_2\text{O} + 2\text{CO} = 4\text{Cu} + 2\text{CO}_2$. Технологическая операция № 4 позволяла восстановить свыше 50 % Cu, содержащейся в шихте. Оставшиеся материалы дробились и проплавились повторно в качестве комплексного флюса и источника меди одновременно, поэтому основную технологию восстановления меди с определенной долей условности можно называть беспшлаковой. На Ближнем Востоке ошлакованные фрагменты глиняных колосников металлургических печей обнаружены в Фейнана, Вади Халид и других памятниках начала эры металла.⁹

Блок технологических операций № 5 связан с литьем и кузнечной обработкой изделий. Все технологические операции блока № 5, включая рафинирование черновой меди, литье медных орудий, их кузнечную обработку, осуществляли представители отдельного клана. Для отливки массивных орудий: проушных топоров-молотов, копий и т. п. — использовались разовые открытые терракотовые формы из необожженной глины с примесью графита и торцевые (металл заливался с обушка) разовые матричные формы с крышками. Сердечники выдавливались моделью или вставлялись готовыми, поверхность форм изнутри затирались графитом.

Основные звенья древнеземледельческой модели металлопроизводства, за исключением технологической операции № 2, требующей значительного профессионального мастерства, успешно верифицированы в 2019–2020 гг. автором статьи в ходе археометаллургических экспериментов. Эффективность древнеземледельческой модели во многом обусловлена клановой системой организации горно-металлургического производства, позволявшей обеспечить высокий уровень разделения трудовых операций. Тем не менее массовое металлопроизводство лимитировалось целым рядом факторов: все этапы подготовки сырья к плавке и сама купритная плавка требовали высокого профессионального мастерства, трудоемкость полной десульфуризации рудных материалов ограничивала объем продукции, распространение технологий ограничивалось территорией древнеземледельческой ойкумены, обмен техническими достижениями

был невозможен даже в соседних очагах металлопроизводства.¹⁰ Все же до экологической катастрофы середины VI тыс. до н. э. в Восточном Средиземноморье и Черноморском бассейне отдельные звенья древнеземледельческой модели на Балканах и Ближнем Востоке эволюционировали в качестве единой технологической системы. В отдельных ближневосточных очагах очень рано — в первой половине V тыс. до н. э. — оказались освоены мышьяковые лигатуры — благодаря регулярному попаданию в шихту вместе с природными купритами никелинов.

*Технологии пастушеской модели
металлопроизводства позднего энеолита —
бронзового века*

Технологии пастушеской модели металлопроизводства на протяжении позднего энеолита с конца V тыс. до н. э. и вплоть до финала бронзового века на рубеже II–I тыс. до н. э. определяли специфику металлопроизводства в большинстве очагов Прото-ЦМП, ЦМП, ЕАМП на Ближнем Востоке и в степях Северной Евразии.

В степях Северной Евразии ранняя фаза технологий пастушеской модели фиксируется в древнеямных памятниках константиновского типа. В степях Восточной Европы они сформировались в конце V — начале IV тыс. до н. э. на основе синтеза протоямных (постстоговских) и протокуроаракских традиций, связанных генезисом с Закавказьем и Восточной Анатolieй.¹¹ В меньшей степени, по сравнению с майкопско-новосвободненской культурой, на формирование культурного комплекса константиновских памятников оказала влияние лейлатепинская традиция. С древнеямными памятниками константиновского типа связано распространение технологий ранней фазы ЦМП в степях Северной Евразии и сопредельных регионах. Своеобразие металла Приуральского ямного очага¹² в рамках ЦМП обусловлено связью исходного константиновского металлокомплекса с очень ранними протокуроаракскими горно-металлургическими традициями второй половины V — начала IV тыс. до н. э. (Прото-ЦМП — Пост-Убейд

⁹ См.: Hauptmann A. The Archaeometallurgy of Copper. Evidence from Faynan, Jordan. XII. Berlin, 2007. Fig. 5.14, 5.28.

¹⁰ См.: Черных Е. Н. Горное дело и металлургия...

¹¹ См.: Богданов С. В. Систематика комплексов древнеямной культуры востока Понто-Каспийских степей в контексте проблемы трансферта горно-металлургических традиций в Северную Евразию // Stratum plus. Археология и культурная антропология. 2017. Вып. 2. С. 139.

¹² См.: Металлургия в циркумпонтийском ареале: от единства к распаду / Черных Е. Н. [и др.] // РА. 2002. № 1. С. 13, рис. 7; Богданов С. В. Эпоха меди степного Приуралья. Екатеринбург, 2004. С. 175–189.

Передней Азии). Носителями константиновской культурной традиции в первой половине IV тыс. до н. э. впервые освоены большинство месторождений Бахмутской котловины, Приазовья, Приуралья и многие другие. Как это ни парадоксально, именно овцеводы — носители древнейшей культуры раннего бронзового века стали первыми героями горно-металлургического фронта степей Северной Евразии.¹³

Пастушеская модель от древнеземледельческой отличалась особенностями природно-климатической, территориальной, хозяйственно-культурной (скотоводческой) системы организации производства, высокой мобильностью, отсутствием клановой ординации технологических операций, спецификой подготовки рудных материалов к плавке пиротехническим (обогачительный и рафинирующий пожог при температурах до 1000°C) и химическим (окисление поташем) путями, способом восстановления меди в малых отражательных печах с сегрегацией выплавляемых материалов на пироксеновый или оливиновый шлаковый короб сверху и цельный лепешкообразный слиток черновой восстановленной меди (93–98% Cu; 0,5–2% Fe; 0,5–1,5% S и др.) на дне печи в изложнице.¹⁴ Различные циклы горно-металлургической деятельности носили выраженный сезонный характер и отчетливо коррелировались со скотоводческими циклами. Основные технологические алгоритмы включали в себя четыре последовательные операции. Первое звено, связанное с добычей и пиротехническим обогащением рудных материалов, в общих чертах соответствовало начальному циклу древнеземледельческой модели. Изначально пастушеская модель металлопроизводства сформировалась в наиболее аридных районах Ближнего Востока типа Вади Араба, где горные разработки соседствуют с вырубленными в тальвеге вади цистернами для запасов воды и множеством неглубоких пожоговых ям, принимавшихся Б. Ротенбергом и его последователями за золотые металлургические печи.¹⁵

¹³ См.: Черных Е. Н. Каргалы: феномен и парадоксы развития. Каргалы в системе металлургических провинций. Потенциальная (сакральная) жизнь архаичных горняков и металлургов. М., 2007. С. 39–55, 111, 112; Богданов С. В. Систематика комплексов древнейшей культуры... С. 139–141.

¹⁴ См.: Пазухин В. А. Медные слитки из Оренбургского музея // СА. 1969. № 4. С. 239–245; Богданов С. В. Технологии горно-металлургического производства эпохи раннего металла... С. 171–173.

¹⁵ См.: Rothenberg B. Ancient Copper Industries in the West-ern Arabia. A Archaeological Survey of the Arabia // Palestine Exploration Quarterly. 1962. Part 1, 94 Year, January–June; Tu-

lecote R. F. Op. cit.; Hauptmann A. Op. cit.

Носителями технологических традиций пастушеской модели добывались и перерабатывались все доступные варианты сульфидных, сульфидно-карбонатных, кремнекарбонатных медных руд с содержанием Cu выше 15–20%. Так же, как и в энеолите, на протяжении бронзового века до середины II тыс. до н. э. разрабатывались месторождения наиболее богатых окисленных руд — сульфидов в медистых сланцах и кремнекарбонатных минералов в медистых песчаниках, а также руды зон окисления и вторичного обогащения различных по генезису офиолитовых месторождений (колчеданных, скарновых, гидротермальных, медно-порфириновых и др.). В минералогическом отношении основу металлургии меди формировали халькозин в комбинации с ковеллином, борнитом, энаргитом, тенантитом, тетраэдритом, станнином, кубанитом и другими доступными сульфидами. Оксиды, кремнекарбонатные и другие минералы составляли не более 15–20% в рудном протолите. В ходе глубокого пожога (600–900°C) в ямах или печах со сложной системой воздухопроводов в конце бронзового века кусковые руды пережигались в пирогенную минеральную смесь пиролит — $\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Cu}_2\text{O} (\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4)$, представлявшую собой обогащенный сульфидно-окисно-сульфатный концентрат, состоящий из халькозина, куприта и долерофанита. Все сульфиды при длительном пожоге в не крупных кусках переходили в халькозин гексагональной сингонии, частично в оксиды и сульфаты, остальные минералы — в оксиды и сульфаты.¹⁶ Объем сульфидов в смеси понижался с 80 до 30%, среднее содержание Cu в пиролите составляло от 20 до 45%. При прямой плавке пиролита так же, как и при прямой плавке сульфидных руд, формируется очень плотная спекшаяся шлаковая масса, состоящая из штейнового борнита, делафоссита, куприта и магнетита, непригодная для дальнейшего передела.

Пирогенная смесь пиролита на длительное время — от 3 месяцев до года — оставалась в пожоговых ямах среди зольных материалов, углей и заливалась водой. Образующийся поташ (K_2CO_3) и другие реагенты окисляли минеральную смесь до состояния твердого раствора дигидрокарбоната и сульфида меди — оксолита: $\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Cu}_2\text{O} (\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4) + 2\text{K}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Cu}_2\text{S} \cdot 2\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2 + 2\text{K}_2\text{O} + \text{SO}_2$. Среднее

lecote R. F. Op. cit.; Hauptmann A. Op. cit.

¹⁶ См.: Термический анализ минералов и горных пород / Иванова В. П. [и др.]. Л., 1974.

содержание Cu в оксолите составляло от 40 до 60 %. Сульфидная фракция (Cu_2S) достигала 30 %, карбонатная ($\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$) — 60 %. Синтез дигидрокарбонатов позволяет депонировать в минеральную смесь C и O_2 , необходимые для восстановления меди в объеме не менее 10 % CO_2 . Добыча, пожар и окисление рудных материалов осуществлялись мужскими группами пастушеских популяций на летовках. Последующие дробление и растирание минеральных смесей, вероятно, производились группами женщин и детей внесезонно. В дальнейших плавках в шихте минеральная смесь дробленого оксолита с зерном не крупнее 1,5 мм являлась основным источником меди.

Восстановление меди происходило в углеродной атмосфере малых металлургических печей (диаметры огневых камер-горнил составляли от 20 до 40 см) отражательного типа из мелкодробленой шихты (от 1 до 4,5 кг) на основе синтезированных дигидрокарбонатов и сульфидов в оксолите с образованием пироксенового (ферросилитового) или оливнинового (фаялитового) стекловатого шлака при использовании силикатного и кальциевого флюсов в температурном интервале от 1100 до 1300 °C: $\text{Cu}_2\text{S} \cdot 2\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 + \text{CaCO}_3 + 2\text{CO} = 6\text{Cu} + \text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6 + \text{CaSO}_4 + 5\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Шихта загружалась в прогретую печь через колошник. Колошниковые газы, прежде всего CO, а на заключительном этапе плавки — O_2 , разогретые свыше 1200 °C, являлись основными восстановителями меди. Принудительный поддув воздуха осуществлялся через фурмы, расположенные в придонной части печи горизонтально. Восстановительная плавка сопровождалась сегрегацией выплавляемых материалов на лепешкообразный слиток черновой меди (среднее содержание Cu — 97–98 %, S — 0,5–1,5 %) внизу, весом от 0,3 до 3 кг, и шлаковый короб вверху. Продолжительность плавки составляла от 1 до 1,5 ч, расход древесного угля составлял от 2 до 7 кг. Мог использоваться некрупный уголь из древесины любых пород, включая прикомлевые части степных кустарников. Технологические и культурные стандарты размеров и весовых параметров слитков меди существенно варьировались в различных культурных традициях бронзового века. Размеры слитков по диаметру соотносятся с фокусом печи, по форме соответствуют изложнице дна печи. Фурменные оси проходили по линиям, разделяющим шлаковый короб и слиток.

В дальнейшем черновая медь рафинировалась дважды (до 98,5–99,5 % Cu) в температурном интервале 1130–1180 °C, постепенно выжигалась практически вся сера. Часть серы, купритов и соединений железа при первом рафинировании формировала халькозин-ковелиновые и магнетитовые новообразования в оливниновых шлаковых настывах. Массивные орудия раннего бронзового века отливались в двусторчатые глиняные или каменные разъемные формы со вставными сердечниками, для отдельных категорий комбинированных проушных орудий сохранялась энеолитическая схема литья в торцевые формы с обушка (топоры-тесла, топоры-молоты и т. п.). Кузнечная обработка орудий из чистой меди осуществлялась в предплавильных режимах белого каления (860–960 °C). На протяжении бронзового века в различных регионах Евразии выработались локальные варианты пастушеской модели, тем не менее клановая дифференциация горно-металлургического производства не оформилась. Специализация на различных горно-металлургических операциях наблюдалась на уровне семей внутри больших родовых групп. Легирование меди минералами мышьяка, олова и другими материалами осуществлялось во время второго рафинирования. В позднем бронзовом веке использование оловянных лигатур сформировало принципиально новую систему дальнедистанционных связей.

Колчеданно-биметаллическая (финальная) фаза развития технологий пастушеской модели металлопроизводства

К середине II тыс. до н. э. в различных регионах степей Северной Евразии доступные запасы сульфидов зон вторичного обогащения ультраосновных месторождений, рудопроявлений медистых сланцев и других традиционных источников сырья оказались исчерпаны в связи с металлургическим бумом, вызванным горно-металлургической деятельностью носителей срубной и алакульской культур. На Каргалинских рудниках и в других горно-металлургических районах степного Приуралья наиболее поздние разработки относятся к сусканскому времени.¹⁷ Выходом из этого затяжного кризиса, растянувшегося на несколько столетий, явилась переработка принципиально нового вида массового металлургического сырья — халькопиритов.

¹⁷ См.: Колев Ю. И. Заключительный этап эпохи бронзы в Поволжье // История Самарского Поволжья с древнейших времен до наших дней. Бронзовый век. Самара, 2000. С. 244–250.

Переработка медно-колчеданного сырья на основе технологических алгоритмов пастушеской модели привела к регулярному производству побочного продукта — железа и кричных шлаков. Восстановление меди из халькопиритового протолита также осуществлялось на протяжении трех технологических операций. На первом этапе осуществлялся длительный окислительный пожар небольших кусков халькопирита (от 2 до 4 см) в объемах от 50–70 кг и выше на дровах в печах талдысайского типа¹⁸ со сложной системой воздухопроводов при температурах от 600 до 900°C с целью преобразования основного сульфида в халькозин, оксиды и сульфаты меди, а образующихся при пожаре руды пиритов — в смесь гематита и сернокислого железа: $6\text{CuFeS}_2 + 18\text{O}_2 = \text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Cu}_2\text{O}(\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4) + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{FeSO}_4 + 8\text{SO}_2$.

На втором этапе халькопиритовый пиролит, состоящий из твердых растворов халькозина, куприта и долерофанита (раствор тенорита и гидроцианита) длительное время (от нескольких месяцев до года) окислялся в ямах, залитых водой, в поташе (K_2CO_3); для осуществления химической реакции периодически в ямы с кусковой пирогенной смесью добавлялись зольные материалы, угольная пыль, вода: $\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Cu}_2\text{O}(\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4) + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{FeSO}_4 + 2\text{K}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Cu}_2\text{S} \cdot 2\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2 + 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{FeSO}_4 + 2\text{K}_2\text{O} + \text{SO}_2$.

На третьем этапе твердый раствор дигидрооксокарбоната и сульфида меди — халькопиритовый оксолит, полученный в ходе второго этапа, — дробился в мелкую крошку (до 1,5 мм) и вместе с марганцевым, силикатным и кальциевым флюсами плавился в восстановительно-окислительных условиях в печи отражательного типа при температурах 1100–1300°C: $\text{Cu}_2\text{S} \cdot 2\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{FeSO}_4 + 2\text{MnO} + 2\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 + 6\text{CO} = 6\text{Cu} + \text{Fe} + (\text{Mn}, \text{Fe})_2(\text{SiO}_4) \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{CaSO}_4 + \text{SO}_2 + 10\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$. Полученная медь обогащалась сернокислым железом до нескольких процентов Fe, железо распределялось в медном растворе неравномерно, перед фурмами медь отличалась более высокой чистотой; шлаковый короб над лепешкообразным слитком состоял из оливи-

новой ассоциации кнебелита и магнетита; часть соединений железа в шлаках восстанавливалась до металлического железа в виде небольших стяжений; если вес слитка восстановленной меди составлял 2–3 кг, стяжений железа в кричных шлаках за одну плавку восстанавливалось примерно до 400 г; для извлечения железа из шлаков их необходимо раздробить и флотировать.

Использование халькопиритов в качестве основного источника рудного сырья позволило существенно расширить рудную базу металлопроизводства в конце бронзового века, увеличить объем производства меди и бронзы, перейти к относительно массовому производству железных предметов. Какого-то единого центра этих металлургических новаций в степных регионах Северной Евразии, вероятно, не имелось. Перенос технологических приемов переработки традиционного сульфидно-кремнекарбонатного сырья на новый вид ресурсов в большинстве очагов происходил постепенно, на протяжении середины — третьей четверти II тыс. до н. э. Очевидным свидетельством этих процессов является железистая (ферритовая) медь основной части орудий классического Сосново-Мазинского клада,¹⁹ относящегося к V этапу металлопроизводства позднего бронзового века по схеме В. С. Бочкарева.²⁰ Основная часть орудий этого клада связана с халькопиритовым протолитом, небольшая группа из пяти орудий — со вторичными сульфидными зонами обогащения медно-колчеданных месторождений. Таким образом, биметаллическая финальная фаза²¹ развития горно-металлургического производства в степных регионах Северной Евразии может иметь несколько иные истоки и хронологические рамки, чем это представляется В. С. Бочкареву и другим авторам. Необходимо подчеркнуть, что не только метеоритное железо,²² но и самородный металл — теллурическое железо из сульфидных медных рудопроявлений, вероятно, в ограниченных масштабах использовались на протяжении всего бронзового века, поэтому древним металлургам были знакомы свойства ферритов, получаемых при переделе основного сульфида. По

¹⁸ См.: Русанов И. А. Экспериментальное моделирование металлургических печей // Комплекс памятников в урочище Талдысай. Алматы, 2013. Т. 1. С. 364–388; Русанов И. А., Ермолаева А. С. Технология производства меди на поселении металлургов Талдысай // Археология Казахстана в эпоху независимости: итоги, перспективы: материалы междунар. науч. конф., посвящ. 20-летию Независимости Республики Казахстан и 20-летию Института археологии им. А. Х. Маргулана КН МОН РК. Алматы, 2011. С. 321–329.

¹⁹ См.: Черных Е. Н. О химическом составе металла клада из Сосновой Мазы // КСИА. 1966. Вып. 108. С. 123–131; Он же. Древнейшая металлургия Урала и Поволжья. МИА. 1970. № 172.

²⁰ См.: Бочкарев В. С., Кашуба М. Т. Культурно-историческая ситуация на юге Восточной Европы накануне века железа // *Stratum plus*. Археология и культурная антропология. 2018. Вып. 3. Рис. 1.

²¹ См.: Они же. Между бронзой и железом. СПб., 2018.

²² См.: Очерки по истории древней железообработки в Восточной Европе / Терехова Н. Н. [и др.]. М., 1997.

химизму ферриты, получаемые при халькопиритовых плавках, близки к теллурическому железу, представляя собой очень чистый металл с небольшим превышением по никелю — до первых десятых процента. В организации горно-металлургического промысла раннего

железного века в степных регионах, конструктивных особенностях металлургических печей, технических приемах загрузки в печь древесного угля и шихты заметны черты преемственности с металлопроизводством бронзового века.²³

Sergey V. Bogdanov

Candidate of Historical Sciences, Institute of Steppe, Ural Branch of the RAS (Russia, Orenburg)
E-mail: bogdanov-step@yandex.ru

TECHNOLOGICAL ALGORITHMS OF THE PASTORAL MODEL OF METAL PRODUCTION IN THE STEPPE REGIONS OF NORTH EURASIA IN THE BRONZE AGE

The original model of metal production was realized in the steppe of North Eurasia since 4th to 2nd millenium BC. It was characterized by unique features of the natural-climatic, territorial, economic-cultural (cattle-breeding) production system. Also, it was notable for specifics of ore preparation for melting using the pyrotechnic method (beneficiating and fining fire under temperatures to 1000°C), and the chemical approach (oxidation by potash), recovery of cooper in reverberatory furnaces with segregation of smelted metals on the pyroxene or olivine slag box above and the whole pancake-shaped ingot of blister recovered cooper (93–98 % Cu; 0,5–2 % Fe; 0,5–1,5 % S and others) on the bottom of an iron mold. Various stages of the mining and smelting industry had a seasonal character and correlated with cattle-breeding cycles. In the steppe of North Eurasia, different variants of the pasturable model had existed for several millennia, combining the two largest metal-production systems of the Old World — Circum-Pontic Metallurgical Country (CPMC) and Eurasian Metallurgical Country (EAMP). The final stages of the metal tools production industry connected with molding and forging processing of items varied substantially in different cultures. Still, basic technological algorithms of cooper production had slightly evolved during the Early Metal epoch. In the steppe of North Eurasia, the metallurgical boom exhausted accessible deposits of resources traditional for 4th–2nd millenium BC, for example, sulfide ore (chalcocite and other minerals) in cooper slates and silica-carbonate metal (chrysocolla and others) in copper sandstones of the Late Permian deposits as well as secondary sulfides of “chalcocite horizons” in zones of secondary concentration of principal deposits. It led to the development of Chalcopyrite raw material of copper-pyrite deposits. The boom was connected with the activity of the Srubnaya and Alakulskaya culture’s miners in the Late Bronze Age. Chalcopyrites processing was based on technological algorithms of the pastoral mining model and metallurgical production had been formed before, in the second half of the 2nd millenium BC. Besides the involvement of practically inexhaustible resources of cooper stuff into the metallurgical division, it led to receiving a byproduct — iron and refinery slag. Theoretical points stated in the paper have been verified by archaeological materials, data of scientific analysis and a series of successful archaeological-metallurgical experiments in 2018–2020.

Keywords: *steppes of North Eurasia, Bronze Age, pastoral model of metal production, ore proto-lith, technology of processing, refining of ore concentrates and pyrotechnic recovery of copper, casting and forging processing of products*

REFERENCES

- Bochkarev V. S., Kashuba M. T. [Cultural and historical situation in the South of Eastern Europe on the eve of the Iron Age]. *Stratum plus. Arkheologiya i kul'turnaya antropologiya* [Stratum Plus. Archaeology and Cultural Anthropology], 2018, iss. 3, pp. 207–220. (in Russ.).
- Bochkarev V. S., Kashuba M. T. *Mezhdu bronzoy i zhelezom* [Between bronze and iron]. Saint Petersburg: IIMK RAN Publ., 2018. (in Russ.).
- Bogdanov S. V. [Systematics of the ancient Yamnaya culture’s complexes of the Eastern Ponto-Caspian steppes in the frame of transfer of ore mining and metallurgy traditions into Northern Eurasia]. *Stratum plus. Arkheologiya i kul'turnaya antropologiya* [Stratum Plus. Archaeology and Cultural Anthropology], 2017, iss. 2, pp. 133–157. (in Russ.).
- Bogdanov S. V. [Technologies of mining and metallurgical production of the early metal era of Northern Eurasia from the standpoint of experimental archaeology]. *Fenomeny kul'tur rannego bronzovogo veka*

²³ См.: Сунчугашев Я. И. Древняя металлургия Хакасии. Эпоха железа. Новосибирск, 1979.

stepnoy i lesostepnoy polosy Evrazii: puti kul'turnogo vzaimodeystviya v V–III tys. do n. e. [Phenomena of cultures of the early Bronze Age of the steppe and forest-steppe zone of Eurasia: ways of cultural interaction in the 5th–3rd millennium BC]. Orenburg: OGPU Publ., 2019, pp. 161–174. (in Russ.).

Bogdanov S. V. *Epokha medi stepnogo Priural'ya* [The era of copper in the Cis-Urals steppe]. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 2004. (in Russ.).

Bogdanov S. V., Tkachev V. V., Yuminov A. M., Avramenko S. V. [Geoarchaeological system of historical copper mines of the Cis-Urals (Kargalinsky) steppe mining and metallurgical center]. *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya – 2018* [Geoarchaeology and archaeological mineralogy – 2018]. Miass: IMin UrO RAN Publ., 2018, pp. 121–133. (in Russ.).

Chernykh E. N. [On the chemical composition of the metal of the treasure from Sosnovaya Maza]. *Kratkiye soobshcheniya Instituta arkheologii* [Brief Communications of the Institute of Archaeology]. Moscow: Nauka Publ., 1966, iss. 108, pp. 123–131. (in Russ.).

Chernykh E. N. *Drevneyshaya metallurgiya Urala i Povolzh'ya* [The most ancient metallurgy of the Urals and the Volga region]. Moscow: Nauka Publ., 1970, no. 172. (in Russ.).

Chernykh E. N. *Gornoye delo i metallurgiya v drevneyshey Bolgarii* [Mining and metallurgy in ancient Bulgaria]. Sofia: Bolgarskaya AN Publ., 1978. (in Russ.).

Chernykh E. N. *Kargaly: fenomen i paradoksy razvitiya. Kargaly v sisteme metallurgicheskikh provintsiy. Potayennaya (sakral'naya) zhizn' arkhaychnykh gornyakov i metallurgov* [Kargaly: Phenomenon and paradoxes of development. Kargaly in the system of metallurgical provinces. Secret (sacred) life of archaic miners and metallurgists]. Moscow: Yazyki slavyanskoy kul'tury Publ., 2007. (in Russ.).

Chernykh E. N., Avilova L. I., Orlovskaya L. B., Kuzminykh S. V. [Ancient metallurgy in the Circumpontic area: from unity to desintegration]. *Rossiyskaya arkheologiya* [Russian Archaeology], 2002, no. 1, pp. 5–23. (in Russ.).

Hauptmann A. *The Archaeometallurgy of Copper. Evidence from Faynan, Jordan*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-72238-0 (in English).

Ivanova V. P., Kasatov B. K., Krasavina T. N., Rozinova E. L. *Termicheskiy analiz mineralov i gornyx porod* [Thermal analysis of minerals and rocks]. Leningrad: Nedra Publ., 1974. (in Russ.).

Kiseleva D. V., Soloshenko N. G., Streletskaya M. V. [et al.]. [Lead isotope analysis in the Bronze Age metal of the steppe Cis-Urals and Trans-Urals]. *XI Vseross. molodezhnaya nauch. konf. "Mineraly: stroyniye, svoystva, metody issledovaniya"* [11th All-Russian Youth Sci. Conf. "Minerals: structure, properties, research methods"]. Ekaterinburg: IGG UrO RAN Publ., 2020, pp. 122–125. (in Russ.).

Kolev Yu. I. [The final stage of the Bronze Age in the Volga region]. *Istoriya Samarskogo Povolzh'ya s drevneyshikh vremen do nashikh dney. Bronzovyy vek* [History of the Samara Volga region from ancient times to the present day. Bronze Age]. Samara: Samarskiy NTs RAN Publ., 2000, pp. 242–301. (in Russ.).

Pazukhin V. A. [Copper ingots from the Orenburg Museum]. *Sovetskaya arkheologiya* [Soviet archaeology], 1969, no. 4, pp. 239–245. (in Russ.).

Rothenberg B. Ancient Copper Industries in the Western Arabah. An Archaeological Survey of the Arabah. *Palestine Exploration Quarterly*, 1962. Part 1, 94 Year, January–June, pp. 5–71. (in English).

Rusanov I. A. [Experimental modeling of metallurgical furnaces]. *Kompleks pamyatnikov v urochishche Taldysay* [Complex of monuments in the Taldysai tract]. Almaty: IA im. A. Kh. Margulana Publ., 2013, vol. 1, pp. 364–388. (in Russ.).

Rusanov I. A., Ermolaeva A. S. [Technology of copper production at the settlement of metallurgists Taldysai]. *Arkheologiya Kazakhstana v epokhu nezavisimosti: itogi, perspektivy: materialy mezhdunarod. nauch. konf., posvyashchennoy 20-letiyu Nezavisimosti Respubliki Kazakhstan i 20-letiyu Instituta arkheologii im. A. Kh. Margulana KN MON RK* [Archaeology in the era of independence, Kazakhstan: results and prospects of the International Sci. Conf. dedicated to the 20th anniversary of Kazakhstan's Independence and the 20th anniversary of the Institute of Archaeology named after A. Kh. Margulan]. Almaty: IA im. A. Kh. Margulana Publ., 2011, vol. 1, pp. 321–329. (in Russ.).

Ryndina N. V. *Drevneysheye metalloobratyvayushcheye proizvodstvo Yugo-Vostochnoy Evropy* [The oldest metalworking production in South-Eastern Europe]. Moscow: Editorial URSS Publ., 1998. (in Russ.).

Ryndina N., Indenbaum G., Kolosova V. Copper production from polymetallic sulphide ores in the northeastern Balkan Eneolithic culture. *Journal of Archaeological Science*, 1999, no. 26, pp. 1059–1068. (in English).

Sunchugashev Ya. I. *Drevnyaya metallurgiya Khakasii. Epokha zheleza* [Ancient metallurgy of Khakassia. Iron Age]. Novosibirsk: Nauka Publ. 1979. (in Russ.).

Terekhova N. N., Rozanova L. S., Zavyalov V. I., Tolmacheva M. M. *Ocherki po istorii drevney zhelezoobrabotki v Vostochnoy Evrope* [Essays on the history of ancient ironworking in Eastern Europe]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1997. (in Russ.).

Tylecote R. F. *A History of metallurgy*. London: Maney Publishing, 1992. (in English).