

Научная статья / Research Article

УДК 903.05

[https://doi.org/10.14258/tpai\(2023\)35\(3\).-02](https://doi.org/10.14258/tpai(2023)35(3).-02)

EDN: YFHWEB

## СЫРОДУТНЫЙ ПРОЦЕСС КАК ОСНОВА ДРЕВНЕЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Владимир Игоревич Завьялов<sup>1\*</sup>, Наталия Николаевна Терехова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт археологии РАН, Москва, Россия;  
v\_zavyalov@list.ru, <http://orcid.org/000-0002-7411-2107>

<sup>2</sup>Институт археологии РАН, Москва, Россия;  
v\_zavyalov@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3657-8600>

\*Автор, ответственный за переписку

**Резюме.** В настоящее время хорошо известны принципы прямого восстановления железа, господствовавшего в металлургии на протяжении более трех тысячелетий. Однако далеко не всегда удается удачно провести экспериментальное моделирование сыродутного процесса. Нами было проведено 35 экспериментальных плавок. В качестве прототипа пиротехнического сооружения выбран полностью сохранившийся сыродутный горн, раскопанный на поселении Колесовка-4. В результате экспериментов установлено, что при обжиге руды происходило не только выгорание органических примесей, но и уменьшалась концентрация кремнезема и глинозема, и таким образом увеличивалось содержание окиси железа. Существенное значение имеет дробление руды. Можно со всей определенностью утверждать, что теоретических знаний недостаточно для осуществления успешного процесса получения железа сыродутным способом.

**Ключевые слова:** археометаллургия, эксперимент, сыродутный процесс, крица, конгломерат

**Благодарности:** статья подготовлена в рамках выполнения Государственного задания Минобрнауки РФ, проект №122011200264-9.

**Для цитирования:** Завьялов В.И., Терехова Н.Н. Сыродутный процесс как основа древней металлургии // Теория и практика археологических исследований. 2023. Т. 35, №3. С. 23–41. [https://doi.org/10.14258/tpai\(2023\)35\(3\).-02](https://doi.org/10.14258/tpai(2023)35(3).-02)

## BLOOMERY PROCESS AS THE BASIS OF ANCIENT METALLURGY

Vladimir I. Zavyalov<sup>1\*</sup>, Nataliya N. Terekhova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Archaeology RAS, Moscow, Russia;  
v\_zavyalov@list.ru, <http://orcid.org/000-0002-7411-2107>

<sup>2</sup>Institute of Archaeology RAS, Moscow, Russia;  
v\_zavyalov@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3657-8600>

\*Corresponding author

**Abstract.** At present, the principles of direct reduction of iron, which dominated in metallurgy for more than three millennia, are well known. However, it is far from always possible to successfully carry out experimental modeling of the bloomery process. We have carried out 35 experiments. A fully preserved bloomery furnace, excavated at the settlement Kolesovka-4, was chosen, as a prototype of the

pyrotechnic structure. As a result of the experiments, it was found that during the roasting of the ore, not only the burnout of organic impurities occurred, but also the concentration of silica and alumina decreased, and thus the content of iron oxide increased. The crushing of ore is essential. It can be stated with all certainty that theoretical knowledge is not enough to implement a successful process of obtaining iron by the bloomery method.

**Keywords:** archeometallurgy, experiment, bloomery process, bloom, conglomerate

**Acknowledgments:** the article was prepared as part of the implementation of the State task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project 122011200264-9.

**For citation:** Zavyalov V.I., Terekhova N.N. Bloomery Process as the Basis of Ancient Metallurgy. *Teoriya i praktika arheologicheskikh issledovaniy = Theory and Practice of Archaeological Research*. 2023;35(3):23–41. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/tpai\(2023\)35\(3\).-02](https://doi.org/10.14258/tpai(2023)35(3).-02)

## **В**ведение

Начало освоения процесса металлургического получения железа следует относить к концу III — началу II тыс. до н.э. Подтверждением этому могут служить сами предметы из железа: кинжалы из Аладжа Хююка (Özgüç, 1963, p. 15; Wertime, 1973, p. 885) и Телль-Асмана (Frankfort, 1950, p. 100; Waldbaum, 1980, p. 70), наконечник копья из Бухена (Waldbaum, 1978, p. 22). Артефакты были подвергнуты аналитическому исследованию, подтвердившему их металлургическое происхождение.

Древнее производство черного металла основывалось на способе прямого восстановления железа из руды. При этом содержащаяся в руде окись железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в атмосфере оксида углерода (CO) при высоких температурах переходила в металлическое железо. Для осуществления подобного процесса требовались специальные пиротехнические сооружения — сыродутные горны, в которые через глиняную трубку — сопло — нагнетается воздух. Сам термин «сыродутный» появился в XIX в. и был связан с характеристикой подаваемого воздуха («сырой» в отличие от нагретого, применяемого в современных домнах). Для успешного протекания процесса требуется достижение определенной температуры, которая способствует восстановлению железа и отделению пустой породы. Теоретические основы прямого восстановления железа из руды были разработаны и сформулированы в 1-й половине XX в. русским ученым-металлургом А.А. Байковым (1948). Как обосновано А.А. Байковым, успешное протекание сыродутного процесса проходит при температуре в рабочем пространстве горна не ниже 1100 °С, а температура горения угля в зоне подачи воздуха и крицеобразования — не менее 1300–1350 °С (Байков, 1948, с. 71). Именно такие значения продемонстрировал термический анализ ряда археологических шлаков (Гурин, 1982, с. 32; 1987, с. 18; Монгайт, 1955, с. 100; Рабинович, 1950, с. 117).

В результате сыродутного процесса образовывалось кричное железо в виде губки либо в виде относительно монолитной массы.

Попытки подтвердить теоретические обоснования на практике в ходе эксперимента далеко не всегда приводили к положительному результату. Например, признанный авторитет в области экспериментальной археометаллургии П. Крю только в половине проведенных экспериментов получил положительный результат (Crew, 2013, p. 32). Адекватно воспроизвести мастерство древних металлургов все еще остается сложной задачей и многие технологические вопросы далеки от решения. В то же время в совре-

менных исследованиях именно эксперимент является тем методом, с помощью которого можно проверить правильность или ошибочность теоретических построений.

В отечественной науке первым предпринял попытки получить железо сыродутным способом Б.А. Колчин. Описание проведенных экспериментов было опубликовано им в совместной с О.Ю. Круг статье, где приведена также сводка предшествующих зарубежных экспериментов (Колчин, Круг, 1965). Работы по моделированию сыродутного процесса были проведены Б.А. Колчиным в 1961 и 1962 гг. на базе Новгородской археологической экспедиции. Для проведения экспериментов была построена наземная шахтная печь со шлаковыпуском древнерусского типа, реконструированная по обобщенным археологическим и этнографическим данным. Горн представлял собой глиняный цилиндр диаметром 1,05 м и высотой 0,8 м с шахтой в центре. Высота шахты равнялась 60 см (Колчин, Круг, 1965, с. 198). Всего было проведено 17 плавок. Во всех экспериментах получено губчатое железо, которое, однако, не удалось превратить в монолитный кусок металла, пригодный дляковки изделий: при ударе молотом губка рассыпалась. Проведенные эксперименты позволили Б.А. Колчину сделать выводы об оптимальных условиях для успешности процесса. К ним относятся обогащение руды (обжиг, измельчение), соотношение руды и древесного угля, температурный режим, время выпуска шлака (Колчин, Круг, 1965, с. 214–215). При несоблюдении этих условий в результате процесса получался металлургический конгломерат: смесь шлака, частиц железа, руды и угля. На основе экспериментов Б.А. Колчин сделал важный вывод о том, что конгломерат может быть использован для получения кричного железа, т.е. может рассматриваться в качестве сырьевого материала (Колчин, Круг, 1965, с. 215). Аналогичного мнения придерживался и А. Эспелунд (2010, с. 47; Espelund, 2005, p. 21), который допускал возможность проведения двухступенчатого процесса получения железа. Следует отметить, что с конгломератом, полученным в ходе предыдущих неудачных плавок, успешно работали чешские экспериментаторы (Hošek, Merta, Barák, 2010, p. 25).

### ***Материалы и методы***

Обобщая известные нам экспериментальные данные, учитывая как позитивный, так и негативный опыт российских и зарубежных исследователей, мы также обратились к экспериментам по металлургическому получению черного металла. Основными целями экспериментов были следующие: проверка руд, полученных из археологически выявленных рудопроявлений, возможность проведения двухступенчатого сыродутного процесса с использованием металлургического конгломерата; отработка оптимальных режимов дутья.

Наши экспериментальные работы проводились в г. Рязани при непосредственном участии кузнеца-экспериментатора М.А. Раткина на базе ООО «Арта».

Особенностью проводимых нами экспериментов было то, что в качестве сырья использовалась руда из рудопроявлений на территории Рязанской области, эксплуатировавшихся в древнерусское время. Именно проблема выявления и характеристики сырьевых источников является наиболее сложной в изучении древней металлургии железа.

К настоящему времени в ходе наших работ на территории Рязанской области выявлено три месторождения железной руды, которые могли эксплуатироваться средневековыми металлургами (рис. 1). Прежде всего это рудопроявление у средневекового

поселения Истье-2 в Старожиловском районе Рязанской области. Памятник открыт В.М. Буланкиным в 2008 г. в ходе археологической разведки (Буланкин, 2009).

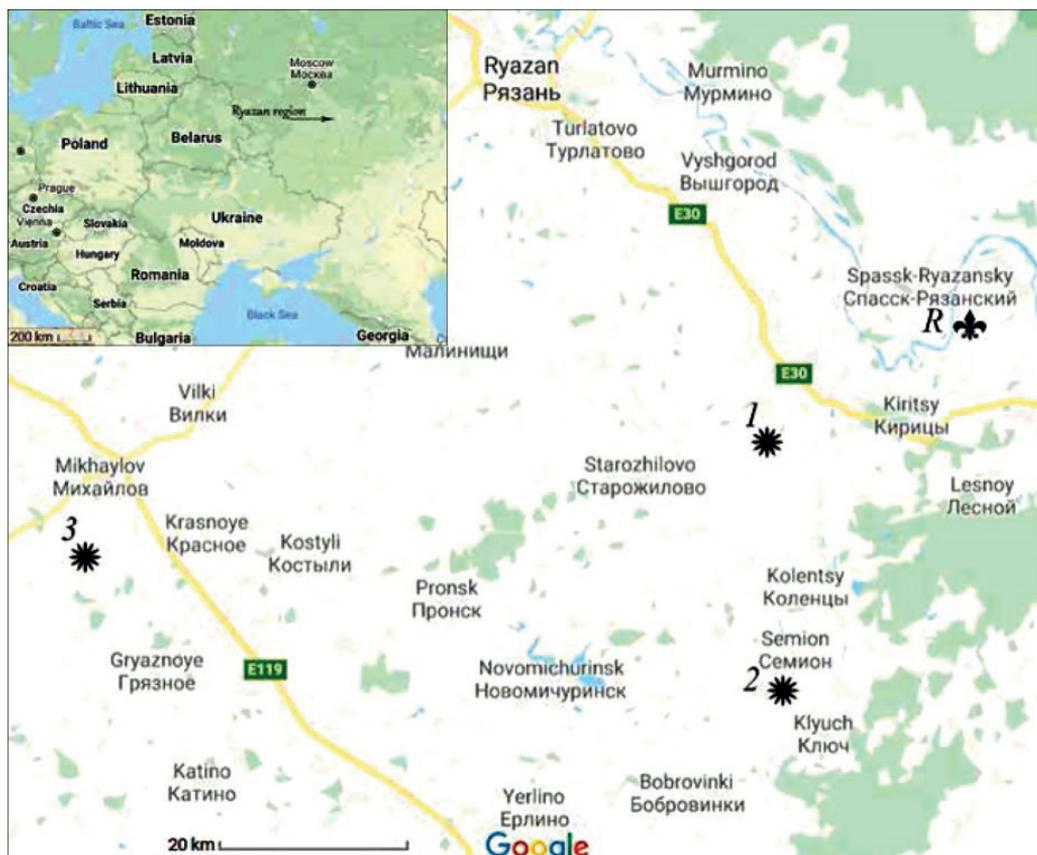


Рис. 1. Карта средневековых рудопоявлений на территории Рязанской области:

1 – Истье; 2 – Проня (около городища Толпино); 3 – Локня.

R – столица Рязанского княжества (Старая Рязань)

Fig. 1. Map of medieval ore occurrences in the Ryazan region:

1 – Iste; 2 – Pronya (near hill-fortress Tolpino); 3 – Loknya.

R – the capital of Ryazan principality (Staraya Ryazan)

На селище Истье-2 выявлены следы металлургического производства — многочисленные фрагменты шлаков, металлургического конгломерата, кричного железа, фрагменты керамических сопел, скопления прокаленной глины и древесного угля, остатки сырдутных горнов (Буланкин, Завьялов, Иванов, 2012). По типу руда из Истья относится к сидеритам (Войлошников, Войлошникова, 1991).

Другим пунктом, где было обследовано рудопоявление, являются окрестности Толпинского городища (информация краеведа С.В. Пасынкова) в Кораблинском районе Рязанской области. Памятник расположен на реке Проне, между селами Незнано-во и Семион (Иванов, Стрикалов, Челябинов, 2005, с. 343; Челябинов, 2012). На городище

встречены куски железного шлака, что позволяет предполагать наличие местного металлургического производства.

В ходе обследования территории в непосредственной близости от городища на склоне первой надпойменной террасы были обнаружены выходы ожелезненной породы охристого цвета. В ней попадались довольно крупные куски железной руды. При зачистке склона в охристом слое встречены прослойки железной руды.

Третье рудопроявление обследовано на р. Локня (Михайловский район Рязанской области) недалеко от ее впадения в р. Проню. Месторождение открыто рязанскими спелеологами весной 2007 г.<sup>1</sup> Оно располагается на первой надпойменной террасе. Территория рудопроявления покрыта воронками (запльвившими рудокопными ямами-дудками) диаметром до 8 м и глубиной до 3–3,5 м, которые протянулись вдоль берега реки на расстояние около 200 м. Практически все дудки со временем заплыли и в настоящее время сильно задернованы. Ситуация очень сходна с рудопроявлением на р. Истья. На дне одной из дудок зафиксирован ход в небольшой забой. Спелеологам в 2007 г. удалось пробраться внутрь и сделать несколько снимков. На стенах и потолке видны следы инструмента. Цвет породы — от желтого до темно-коричневого. Руда залегает неглубоко от поверхности в песчанике. По внешнему виду руда напоминает образцы из Истья и Толпино, т.е., по всей видимости, также относится к сидеритам.

Характеризуя руды трех вышеперечисленных рудопроявлений, следует отметить, что по данным РФА наиболее богатой оказалась истьянская руда — от 40%Fe до 59,34%Fe. Максимальное содержание железа в обожженной толпинской руде составило 53,08%Fe. Невысокое содержание железа показала руда из рудопроявления на р. Локне — 20,98–29,76%Fe (табл. 1). Но, возможно, такое низкое содержание железа объясняется отбором образцов из верхних, наиболее бедных слоев рудоносного слоя.

Рязанские руды, как уже упоминалось, по типу относятся к сидеритам, для которых, в отличие от лимонитов, не характерно присутствие фосфора. Действительно, как показал рентгенофлюоресцентный анализ, содержание фосфора и в руде, и в конгломерате из поселения Истье-2 не превышало 1,2%, а у большинства образцов содержание этого элемента не превышало 0,5% (низким считается содержание фосфора в шлаке не более 0,75%, см.: Pleiner, 2000, p. 252). В ходе экспериментальных работ было установлено, что железо, полученное из руд истьянского и толпинского рудопроявлений, практически не содержало фосфора (Завьялов, Терехова, 2013, с. 55). Этот вывод коррелирует с результатами массовых археометаллографических анализов железных изделий из памятников на территории Рязанского княжества: фосфористое (высокотвердое) железо фиксируется на единичных и, как правило, импортных образцах (Завьялов, Терехова, 2013, с. 147).

<sup>1</sup> <http://styx-speleo.ru/ryazanskie-peshchery/96-zheleznyj-rudnik-na-lokne>

Таблица 1  
 Химический состав руды из рудопроявлений на территории Рязанского княжества по данным РФА, вес.%  
 Tab. 1  
 The chemical composition of ore from ore occurrences on the territory of the Ruzan Principality according to XRF data, wt%

Образец	Ag	Zr	Zn	Co	Fe	Mn	Cr	V	Ti	Ca	K	Al	P	Si	Cl	S	Mg
Руда Истье	0,02	0,01	0,03	-	45,67	1,35	0,04	-0	0,11	2,09	1,13	5,06	0,77	13,82	0,03	0,09	-
Руда Истье	0,02	0,01	-	-	40,93	1,65	0,05	0,03	0,17	1,81	2,63	4,88	0,34	15,33	0,02	0,07	-
Руда Истье	0,03	0,01	0,01	-	55,3	0,98	0,06	0,02	0,21	1,8	1,2	7,35	0,41	16,49	0,05	0,29	-
Руда Истье	0,03	0,01	0,02	-	49,59	0,44	0,06	0,03	0,24	1,73	1,37	9,18	0,57	19,85	0,01	0,11	-
Руда Истье	0,02	0,01	0,02	-	40,03	1,12	0,04	0,03	0,39	2,77	1,56	7,97	0,79	22,32	0,02	0,12	-
Руда Истье	0,05	-	0,01	-	46,72	1,95	0,05	0,03	0,11	3,14	2,76	4,23	0,41	10,81	0,06	0,03	-
Руда Истье	0,02	-	0,02	-	56,86	1,19	0,05	0,04	0,16	1,27	0,96	7,26	0,4	15,3	0,02	0,19	-
Руда Истье	0,02	0,02	0,02	-	41,02	0,46	0,03	0,02	0,24	1,66	1,32	6,77	0,49	19,31	0,02	0,1	-
Руда Истье	0,02	0,01	0,02	-	56,46	0,38	0,05	0,03	0,1	1,44	0,72	5,38	0,7	12,51	0,05	0,15	-
Руда Истье	0,04	-	-	-	59,34	1,49	0,06	0,03	0,08	1,05	0,67	1,71	0,13	5,75	0,07	0,09	2,56
Руда Толпино	0,03	0,01	0,16	-	48,63	5,55	0,03	-	0,11	2,53	0,98	4,42	0,78	10,9	0,06	0,85	-
Руда Толпино	0,02	0,02	0	0,26	29,85	10,79	0,04	0,03	0,22	0,75	0,82	2,1	-	11,4	0,08	0,31	-
Руда Толпино	0,02	0,02	0,07	-	38,24	0,03	0,04	0,02	0,14	0,56	0,39	1,52	0,04	11,03	0,05	0,65	1,8
Руда Толпино	0,02	-	0,01	-	53,08	-	0,05	0,02	0,04	0,12	0,15	0,42	-	5,23	0,07	0,05	-
Руда Локня	0,038	-	0,011	-	23,045	0,401	0,011	0,007	0,043	2,4	0,218	3,6	-	27,102	-	-	-
Руда Локня	-	-	0,008	-	26,887	0,631	0,022	0,028	0,131	0,042	0,407	10,926	-	26,18	-	0,019	-
Руда Локня	0,007	-	0,005	-	28,504	0,721	0,023	0,017	0,084	0,038	0,37	9,856	-	23,901	-	-	-
Руда Локня	0,02	-	0,008	-	32,277	1,034	0,024	0,018	0,068	1,492	0,392	11,324	0,359	20,455	-	0,037	-
Руда Локня	0,025	-	0,021	-	31,08	0,921	0,022	0,048	0,158	2,274	0,354	14,777	0,624	18,873	-	0,069	-

В качестве прототипа экспериментального пиротехнического сооружения был выбран полностью сохранившийся сыродутный горн, раскопанный на поселении Колесовка-4 (Наумов, Наумова, Шмелев, 2018), расположенном на северной окраине Устьинского археологического комплекса XII–XIV вв. (Тульская обл.). Горн представлял собой свободно стоящее, округлое в плане сооружение диаметром в колошниковой, верхней части до 40 см, на уровне основания — до 75 см. Горн имел монолитную глинобитную конструкцию, с вертикальной шахтой высотой до 75 см. С запада в его нижней части на уровне лещади располагалось отверстие — грудь печи, через которое нагнетали воздух внутрь горна и вынимали готовую крицу. Перед грудью печи располагалась небольшая глинобитная площадка, окаймленная по бокам невысокими бортиками. Горн возведен на глинобитном основании, которое было несколько шире, чем нижняя часть сооружения. Основание горна по периметру имело прослойку известнякового щебня. Внешняя поверхность горна обмазана слоем глины (Наумов, Наумова, Шмелев, 2018, с. 82). В отличие от горна, использовавшегося Б.А. Колчиным, шахта нашего горна, как и у его прототипа, имела не усеченно-коническую, а колбообразную (или слегка грушевидную) форму. По-видимому, подобная форма имела определенное технологическое значение. По крайней мере, в тех случаях, когда шахту горна удастся реконструировать, она часто имеет в разрезе такую или близкую форму (Афанасьев, Николаенко, 1982, с. 169; Брайчевская, 1956; Семькин, 1996, с. 101; Pleiner, 2000, p. 151).

### *Результаты*

Эксперименты с горном по типу найденного в Колесовке начиная с 2016 г. проходят по настоящее время ежегодно. Для проведения экспериментальных работ по моделированию сыродутных процессов была построена точная копия горна из Колесовки. На береговом склоне пруда близ села Голенчино (г. Рязань)<sup>2</sup> для установки горна была выкопана яма диаметром 0,9 м и глубиной 0,55 м. В яме возведено основание горна из щебня и глины. В основании выкопана горновая яма диаметром 0,46 м, выложенная бутовым камнем. Затем из бута в один ряд возведена нижняя часть горна, обмазанная смешанной с травой глиной. На этом основании из глины и бутового камня сооружен горн. При возведении передней стенки горна на месте фурмы было установлено деревянное лекало. В силу ограниченности во времени нам не удалось изготовить фурмы из глины, как это имело место у натурального горна. Каждый раз при установке сопла отверстие закладывалось глиной, которая удалялась для выемки крицы после завершения процесса. Последней операцией была обмазка горна снаружи и внутри раствором глины. Сооружение сыродутного горна (без подготовительных работ) заняло около часа. После просушки в течение недели шахта горна была обожжена сухими сосновыми дровами.

При экспериментальных плавках использовались как ручные мехи (рис. 2), так и механическое дутье с помощью электромотора. Разница в подаче воздуха была незначительна: в первом случае скорость воздушного потока составляла 8,5–8,7 м/сек., во втором — 10 м/сек. При проведении всех экспериментов использовались специально вылепленные из местной глины (с добавлением песка или древесного угля) сопла. Дли-

<sup>2</sup> Экспериментальные работы проводились на базе ООО «Арта». Автор реконструкции — М.А. Раткин.

на сопел составляла 20–25 см, внутренний диаметр — 2–2,5 см. Размеры сопел имеют аналогии в образцах из поселения XII в. Истье-2 (Иванов, 2017). В горн сопла вставлялись под углом около 30°.



*Рис. 2. Работа экспериментального горна с ручными мехами*

*Fig. 2. Operation of the experimental bloomery furnace with hand bellows*

Всего было проведено 35 плавок как с выпуском, так и без выпуска шлака. Из них удачными, в ходе которых было получено кричное железо, можно считать не более трети. Руда перед плавкой обжигалась костровым способом: на ряд деревянных жердей укладывался слой руды, который перекрывался жердями, вновь насыпался слой руды, и так четыре-пять слоев. Обжиг руды продолжался от одного до полутора часов (до полного прогорания дерева). В итоге руда теряла 7–10% первоначального веса.

Проведенные нами исследования показали, что отделение пустой породы (кремнезема и глинозема) происходит уже на стадии предварительного обогащения (обжига) руды, при котором сидерит переходил в гематит. Визуально это фиксировалось в изменении цвета руды с желтовато-коричневого на красный. На основании данных РФА был сделан вывод, что в процессе обжига изменялся и химический состав руды: если в сырой руде содержание кремнезема превышало 30%, то в обожженной оно составляло менее 25%. Аналогичную картину демонстрирует и распределение содержания в сырой и обожженной руде глинозема ( $Al_2O_3$ ). Данное наблюдение подтверждает обязательность проведения такой предварительной операции, как обжиг руды (Колчин, Круг, 1965, с. 202), в процессе которой не только выгорали органические примеси и удалялась влага, но, как установлено нами, происходило и частичное очищение руды от пустой породы.

Процесс начинался с прогрева горна сухими сосновыми дровами в течение 1–1,5 ч. В конце прогрева температура на колошнике поднималась до 550–600 °С<sup>3</sup>. После этого горн порциями засыпался до колошников древесным углем, и давалось усиленное дутье.

Соотношение руды и древесного угля в шихте составляло от 1 : 1 до 1,5 : 1 (не считая угля, загруженного в горн перед началом процесса). Шихта добавлялась в горн порциями по 2–3 кг (сначала руда, потом уголь) после оседания предыдущей порции. Промежутки между засыпками шихты составляли от 5 до 15 мин. При этом замечено, что в наиболее удачных экспериментах эти промежутки были минимальны. Таким образом, для засыпки 10 кг руды требовалось около 1,5 ч, а сам процесс (от засыпки первой порции шихты) занимал 3–4 ч.

Приведем описание наиболее удачных экспериментов с использованием руды и археологического конгломерата, проведенных в июле 2019 г.

Эксперимент №1.

*Цель эксперимента:* обработка оптимальных режимов дутья на примере руды из Истьянского рудопоявления.

*Оборудование:* модель сыродутного горна типа Колесовка-4, ручные мехи.

*Сырье:* обожженная руда Истьянского рудопоявления, бытовой древесный уголь, флюс (известь).

*Ход эксперимента:*

9.45 — начало прогрева сыродутного горна сосновыми дровами.

11.00 — температура на колошнике 600 °С. Фурма закрыта. Засыпано 7 кг древесного угля порциями в 3, 2 и 2 кг. Дано усиленное дутье.

11.12 — засыпана первая порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

11.20 — вторая порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

11.26 — третья порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

11.36 — четвертая порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

11.45 — дутье уменьшено.

11.46 — пятая порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

11.52 — дутье усилено.

11.58 — добавлен флюс (1 кг извести).

12.02 — шестая порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

12.08 — выпуск шлака; шлак не течет.

12.17 — седьмая порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

12.25 — дутье уменьшено.

12.30 — восьмая порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

12.39 — дутье усилено.

12.48 — выпуск шлака; шлак не течет.

12.55. — девятая порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

13.08 — десятая порция шихты (3 кг руды и 2 кг угля).

13.12 — третий выпуск шлака; вытекло незначительное количество шлака.

13.47 — дутье уменьшено.

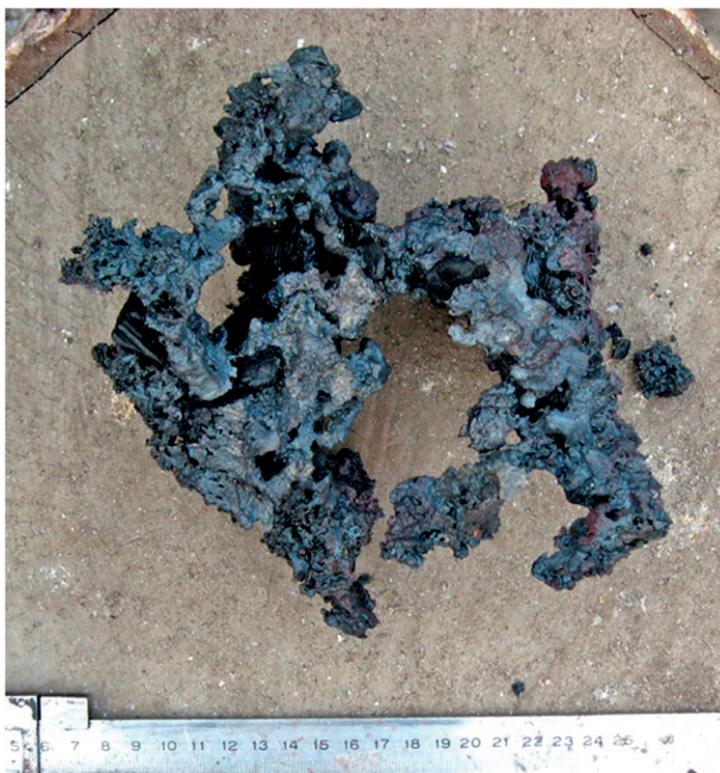
<sup>3</sup> Температура замерялась с помощью лазерного пирометра.

14.20 — дутье прекращено.

14.49 — разбор горна.

*Итого использовано:* 30 кг руды, 27 кг угля, 1 кг извести.

*Результат:* несколько фрагментов губчатого железа общим весом около 1,5 кг (рис. 3). Микроструктура — феррит и феррито-перлит. Химический состав губчатого железа приведен в таблице 2. Отмечено, что изменение мощности дутья (интенсивное в начале и более умеренное в ходе плавки) благоприятно сказывается на протекании процесса. Существенного влияния флюса (извести) на результат плавки не отмечено — металлургический шлак оставался вязким.



*Рис. 3. Губчатое железо, полученное в ходе эксперимента №1*

*Fig. 3. Sponge iron from experiment №1*

Важным результатом успешности проведения сыродутного процесса является индекс вязкости шлаков, который показывает, насколько полно из шихты удалена пустая порода (прежде всего, кремнезем и глинозем). По данным Г. Бахмана, индекс вязкости археологических шлаков находится в диапазоне примерно от 0,5 до 1,0 (Bachman, 1982, p. 19). Расчет индекса вязкости для полученных в ходе экспериментов шлаков показал, что только у одного образца этот индекс близок к указанному диапазону. В ходе металлографического исследования на этом образце обнаружена равномерная темно-серая

структура (фаялит) с большим количеством пор и отдельными округлыми включениями белого цвета, т.е. именно этот образец является действительно шлаком. Все же остальные фрагменты (как экспериментальные, так и археологические) показали индекс вязкости значительно больше 1, т.е. практически не обладали текучестью и являлись конгломератом.

Учитывая предположение Б.А. Колчина по поводу возможности использования в металлургическом процессе конгломерата, в ходе экспериментов мы применяли конгломерат, обнаруженный при археологических раскопках в Истье-2, Старой Рязани, Старой Русе. Особый интерес представляет конгломерат из Истье-2, где на площади 4 кв. м было обнаружено более 20 кг мелко дробленого конгломерата, по-видимому, подготовленного для дальнейшей переработки. Наиболее удачный эксперимент с конгломератом из Старой Рязани проведен в августе 2019 г.

Таблица 2

**Химический состав губчатого железа, полученного в ходе эксперимента №1, вес.%**

Tab. 2

**The chemical composition of sponge iron obtained during the experiment №1, wt%**

Fe	Sn	Ag	Mo	Zr	Cu	Ni	Mn
94.382	0.014	0.026	0.006	0.009	0.03	0.1	0.088
Al	P	Si	S	Mg			
1.065	0.087	4.11	0.083	0.001			

Эксперимент №2.

*Цель эксперимента:* получение горновой крицы из археологического конгломерата.

*Оборудование:* модель сыродутного горна типа Колесовка-4, ручные мехи, лазерный пирометр.

*Сырье:* конгломерат, полученный при раскопках в Старой Рязани (табл. 3), бытовой древесный уголь.

Таблица 3

**Химический состав конгломерата из Старой Рязани, вес.%**

Tab. 3

**The chemical composition of conglomerate from Staraya Ryazan, wt%**

Fe	As	Mo	Zr	Mn	Cr	Ti	Al	S	P	Si	Ca	K	Cl
29,248	0,01	0,004	0,003	0,235	0,014	0,027	0.824	0.863	0.957	1.85	6.058	0.105	0.084
26,14	0,007	0,005	0,004	0,274	0,012	0,033	1	1.028	1.621	1.451	5.727	0.092	0.05
46,183	0,003	0,003	0,003	0,224	0,011	0,028	2.149	0.651	1.579	3.85	2.624	0.272	0.135
67,981	0,004	0,016	0,002	0,079	0,017	0,033	2.106	0.088	0.194	4.246	0.784	0.222	1.507
56,842	0,009	0,05	0,005	0,362	0,02	0,046	2.945	0.989	2.708	5.518	3.802	1.006	0.403

*Ход эксперимента:*

14.00 — разогрев горна сосновыми дровами.

16.10 — температура на колошнике 600 °С. Фурма закрыта. В горн засыпано 5 кг угля. Дано дуге.

- 16.25 — засыпано 5 кг угля. Горн доверху заполнен углем.  
16.38 — уголь просел. Дутье остановлено.  
17.03 — засыпано 1,5 кг конгломерата. Дано умеренное дутье.  
17.08 — дутье остановлено.  
17.10 — засыпан 1 кг угля. Дано дутье.  
17.12 — засыпано 1,5 кг конгломерата.  
17.20 — засыпано 1,5 кг конгломерата и 1 кг угля.  
17.25 — засыпано 2 кг конгломерата. Дутье остановлено.  
17.30 — засыпано 0,5 кг конгломерата и 1 кг угля. Дутье возобновлено.  
17.45 — засыпан 1 кг угля.  
17.48 — засыпан 1 кг угля.  
17.55 — засыпан 1 кг угля.  
18.06 — засыпан 1 кг угля. Дутье остановлено.  
18.45 — завершение процесса.

*Итого использовано:* 7 кг конгломерата, 17 кг угля.

*Результат:* получены два монолитных фрагмента горновой крицы общим весом 1 кг (рис. 4). Структура криц — феррит с неравномерным (крупным и средним) зерном и большим количеством крупных шлаковых включений. Микротвердость феррита 170–181 кг/мм<sup>2</sup>.

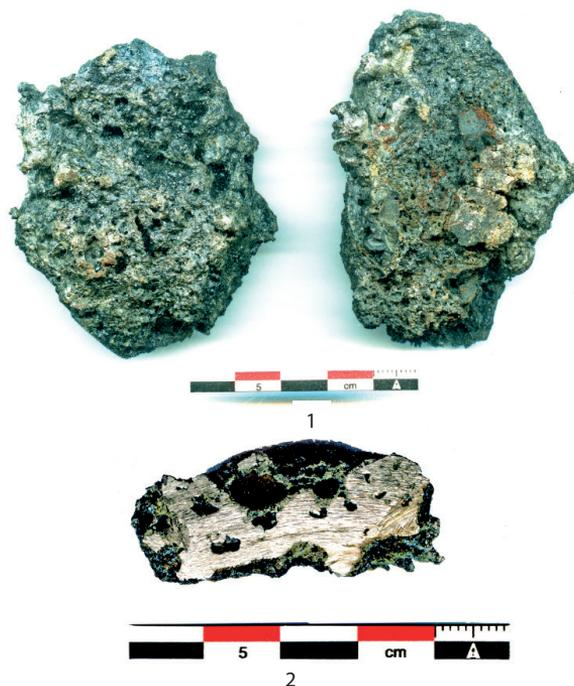


Рис. 4. Горновые крицы, полученные в ходе эксперимента №2 (1), и разрез одной из криц (2)  
Fig. 4. Bloomery iron obtained in the course of experiment №2 (1), and a section of one of the bloom

В июле 2022 г. был проведен эксперимент по реконструкции полного цикла — от получения крицы до выковки готового изделия.

Эксперимент №3.

*Цель эксперимента:* восстановление железа из кричного конгломерата и получение горновой крицы с последующим изготовлением готового изделия — ножа.

*Оборудование:* модель сыродутного горна типа Колесовка-4, электрический мотор, кузнечный горн, ручные мехи, лазерный пирометр.

*Сырье:* археологический конгломерат из селища Малая Стрекаловка (Тульская обл.), бытовой древесный уголь. Конгломерат содержал значительное количество корольков восстановленного железа.

*Ход эксперимента:*

Прогрев горна сосновыми дровами. Дробление конгломерата. В результате ручной сепарации выделено 1,04 кг кричного железа.

12.40 — температура на колошнике 600 °С. Засыпано 2 кг древесного угля. Фурма закрыта, вставлено сопло. Дано дутье.

12.50 — засыпан 1 кг дробленого кричного железа.

12.52 — засыпано 2 кг дробленого конгломерата и 1,5 кг угля.

13.00 — температура в средней части горна 750 °С, в нижней части — 900 °С.

15.00 — температура в нижней части горна 910 °С.

15.10 — завершение эксперимента. Получено два фрагмента кричного железа весом 660 г и 350 г.



Рис. 5. Ковка ножа

Fig. 5. Forging of a knife

На следующем этапе эксперимента большой фрагмент кричного железа был прокован и из него откован нож древнерусского типа. Железо нагревалось в кузнечном горне с применением ручных мехов до светло-желтого каления (1150–1250 °С). Ковка велась до температуры 830–900 °С (светло-красное каление). В качестве топлива использо-

вался бытовой древесный уголь. Первоначальный нагрев длился 20 мин., следующие — 2–3 мин. Продолжительность каждойковки составляла 20–30 сек. Всего для получения полуфабриката потребовалось 22 нагрева. Весь процесс проковки крицы до бруска полуфабриката прямоугольной формы занял около 1 ч. После 12-й проковки заготовка вытягивалась, складывалась пополам и сваривалась для уплотнения металла. В итоге вес прокованного металла составил 172 г (26% от веса первоначальной крицы).

Затем из полученного полуфабриката был откован нож древнерусской формы (рис. 5). Для этого потребовалось 14 нагревов. После седьмого нагрева был вытянут черенок, после восьмого — в четыре приема вытянут клинок, после 13-го нагрева оттянуто лезвие. Всего на изготовление ножа ушло около 35 мин. Вес готового ножа — 132 г (77% от веса полуфабриката и 20% от веса исходной крицы).

При экспериментальных работах большую информацию предоставляют не только успешные, но и неудачные опыты. В качестве примера приводим описание одного из таких экспериментов, проведенного в августе 2021 г.

*Эксперимент №4.*

*Цель эксперимента:* определение параметров работы сыродутного горна со шлаковыпуском.

*Оборудование:* модель сыродутного горна типа Колесовка-4, электромотор, лазерный пирометр.

*Сырье:* металлургический конгломерат из раскопок Истье-2, бытовой древесный уголь.

*Ход эксперимента:*

12.20 — начало прогрева сыродутного горна сосновыми дровами.

13.25 — фурма закрыта, дано дутье. Температура на колошнике 470 °С, в нижней части горна — 650 °С.

13.35 — дано усиленное дутье.

13.43 — температура внутри горна 750 °С.

14.10 — горн засыпан углем до колошников. Дутье уменьшено.

14.30 — засыпана первая порция шихты: 1 кг конгломерата и 1 кг угля.

14.38 — засыпана вторая порция шихты.

14.43 — засыпана третья порция шихты.

14.52 — засыпана четвертая порция шихты.

14.55 — начало шлакоотделения.

15.00 — засыпана пятая порция шихты.

15.10 — засыпана шестая порция шихты.

15.40 — выпуск шлака. После разбития шлаковой пробки шлак тек хорошо.

15.53 — температура на колошниках 800 °С, у сопла — 1150 °С.

16.05 — дутье остановлено.

17.30 — извлечен ком конгломерата.

*Итого использовано:* 6 кг металлургического конгломерата, 13 кг угля.

*Результат:* железо не восстановилось. Причина — процесс завершен слишком рано, что не позволило восстановленному железу сформировать горновую крицу. Время шлаковыпуска (через 30 мин. после засыпки последней порции шихты) выбрано удачно.

### **Обсуждение**

Совокупность полученных в ходе экспериментального моделирования данных позволяет определить некоторые особенности процесса, не отраженные в теоретических изысканиях. Так, например, установлено, что при обжиге руды, как свидетельствуют данные РФА, происходило не только выгорание органических примесей, но и уменьшалась концентрация кремнезема и глинозема, и таким образом увеличивалось содержание окиси железа. Существенное значение имеет дробление руды, благодаря чему увеличивается суммарная площадь соприкасающихся с углеродом частиц руды и улучшается циркуляция газов в горне, позволяющая большей части шихты включаться в восстановительный процесс. Необходимо отметить, что в ходе процесса наряду с кричным железом получался и так называемый конгломерат, который мог использоваться в металлургическом процессе вторично. На успешность проведения процесса, как было замечено, определенное влияние оказывает интервал между загрузками шихты — желательнее, чтобы он был минимальным.

Таким образом, можно со всей определенностью утверждать, что теоретических знаний недостаточно для осуществления успешного процесса получения железа сыродутным способом. В этой связи хочется привести замечание английских археометаллургов о том, что именно экспериментальные работы позволяют надежно интерпретировать металлургическую технологию изготовления древних железных артефактов (Wang, Crew, 2013, p. 401).

### **Заключение**

Приведенные результаты экспериментальных и аналитических исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Большую роль играет выбор местоположения горна. Для успешного контроля над процессом засыпки шихты желательнее, чтобы горн либо находился в углублении, либо был врезан в склон. Заметим, что многие археологически открытые горны именно так и расположены.

2. Шахта горна должна иметь слегка суживающуюся кверху («грушеобразную») форму, что, по-видимому, способствует лучшей циркуляции газов.

3. Наши эксперименты подтвердили, что предварительный обжиг руды являлся обязательной подготовительной операцией сыродутного процесса.

4. Большое значение имеет угол наклона сопла, который должен составлять 25–30°.

5. В подтверждение выводов Б.А. Колчина следует обратить внимание на время выпуска шлака — оптимально его следует проводить через некоторое время после засыпки последней порции шихты.

6. В конечном итоге удача сыродутного процесса во многом зависит от опыта и навыков мастера-металлурга.

### **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

Афанасьев Г.Е., Николаенко А.Г. О салтовском типе сыродутного горна // СА. 1982. №2. С. 168–175.

Байков А.А. Физико-химические основы способов прямого восстановления железа из руд // Собрание трудов. Т. II. М.; Л. : Академия наук СССР, 1948. С. 356–381.

Брайчевская А.Т. Железоплавильный горн в Новой Покровке // Краткие сообщения Института археологии УССР. 1956. Вып. 6. С. 64–67.

Буланкин В.М. Отчет об археологических разведках в Рязанской области в 2008 г. // НА РИАМЗ. 2009. №3991.

Буланкин В.М., Завьялов В.И., Иванов Д.А. Поселение Истье-2 — сырьевая база Старой Рязани // Археология Подмосковья. Вып. 8. М. : ИА РАН, 2012. С. 166–174.

Войлошников В.Д., Войлошникова Н.А. Минеральные ресурсы Рязанской области и проблема их исследования // Рязанский край. История. Природа. Хозяйство (к 900-летию г. Рязани). Рязань : Рязанское отделение Советского фонда культуры, 1991. С. 194–207.

Гурин М.Ф. Древнее железо Белорусского Поднепровья. Минск : Наука и техника, 1982. 126 с.: ил.

Гурин М.Ф. Кузнечное ремесло Полоцкой земли IX–XIII вв. Минск : Наука и техника, 1987. 151 с.: ил.

Завьялов В.И., Терехова Н.Н. Кузнечное ремесло Великого княжества Рязанского. М. : ИА РАН, 2013. 272 с.: ил.

Иванов Д.А. Воздуходувные сопла с древнерусского производственного поселения Истье-2 // Археология Подмосковья. Вып. 13. М. : ИА РАН, 2017. С. 88–98.

Иванов Д.А., Стрикалов И.Ю., Челяпов В.П. Поселенческая структура XII–XV вв. междуречья Прони и Рановы // Великое княжество Рязанское. М. : Памятники исторической мысли, 2005. С. 336–360.

Колчин Б.А., Круг О.Ю. Физическое моделирование сыродутного процесса производства железа // Археология и естественные науки. М. : Наука, 1965. С. 196–215.

Монгайт А.Л. Отчет о работе Рязанского отряда Среднерусской экспедиции в 1955 г. // Архив ИА РАН. Р-1, №1205.

Наумов А.Н., Наумова Т.В., Шмелев В.Н. Уникальная находка металлургического комплекса XIV в. на Куликовом поле // Город средневековья и раннего нового времени. IV. Археология. История. Тула : Государственный музей-заповедник «Куликово поле», 2018. С. 81–102.

Рабинович М.Г. Великий посад Москвы. (Итоги работ Московской экспедиции [1949 г.]) // Вести АН СССР. 1950. №9. С. 113–120.

Семькин Ю.А. Черная металлургия и металлообработка на Болгарском городище // Город Болгар. Ремесло металлургов, кузнецов, литейщиков. Казань : ИЯЛИ АН Татарстана, 1996. С. 89–153.

Челяпов В.П. Толпинское городище и его округа // Восточноевропейский город в контексте этнокультурных, политических и поселенческих структур. Рязань : РИ-АМЗ, 2012. С. 160–161.

Эспелунд А. Черная металлургия в Норвегии на раннем этапе развития // РА. 2010. №3. С. 44–50.

Bachman H.-G. The Identification of Slags from Archaeological Sites. London : Institute of Archaeology, 1982. 77 p.

Crew P. Twenty-five Years of Bloomery Experiments. In: D. Dungworth and R.C.P. Doonan (eds). Accidental and Experimental Archaeometallurgy. London, 2013. P. 25–50.

Espelund A. Bloomery Ironmaking — Witness of Skill and Organization in the Past. In: Reports. International Symposium “Metallurgy in Southeast Europe from Ancient Times till the End of 19<sup>th</sup> Century”. Sozopol : Nauchno-tekhicheski s’uz po minno delo, geologiya i metalurgiya, 2005. P. 13–21.

Frankfort H. Early Iron in Iraq. *Man*. 1950. 50. P. 100.

Hošek J., Merta J., Barák M. Metalografický rozbor železného polotovaru z tavby v rekonstrukci pece s tenkou hrudí provedené 14.5.2008 ve Staré Huti u Adamova. In: *Archeologia technical* 21. Brno : Technické museum v Brně, 2010. S. 25–30.

Özgüç T. Early Anatolian Archaeology in the Light of Recent Research. *Anatolia*. 1963;7:1–21.

Pleiner R. Iron in Archaeology. The European Bloomery Smelters. Praha : Archeologický Ústav Akademie věd České republiky, 2000. 400 p.; il.

Waldbaum J.C. From Bronze to Iron. Göteborg : Paul Åströms förlag, 1978. 106 p.

Waldbaum J.C. The First Archaeological Appearance of Iron and the Transition to the Iron Age. In: *The Coming of the Age of Iron*. New Haven and London : Yale University Press, 1980. P. 69–98.

Wang Q., Crew P. A Scientific Study of Bloomer Irons Experimentally Smelted from Different Ores. In: J. Humphris and T. Rehren (eds). *The World of Iron. Proceedings of a Conference at the Natural History Museum*. London : Archetype, 2013. P. 393–401.

Wertime T.A. The Beginnings of Metallurgy: A New Look. *Science*. 1973;182(30 Nov.):875–887.

## REFERENCES

Afanasyev G.E., Nikolaenko A.G. To the Question of the Saltovo Type Bloomery Furnace. *Sovetskaya arkheologiya = Soviet Archaeology*. 1982;2:168–175. (*In Russ.*)

Baykov A.A. Physical and Chemical Bases of Methods of Direct Reduction of Iron from Ores. In: *Collection of Works*. Vol. II. Moscow; Leningrad : Akademiya Nauk SSSR, 1948. P. 356–381. (*In Russ.*)

Braychevskaya A.T. Ironmaking Furnace in Novaya Pokrovka. *Kratkie soobshcheniya Instituta arheologii USSR = Brief Communications of the Institute of Archaeology of USSR*. 1956;6:64–67. (*In Russ.*)

Bulankin V.M. The Report about Archaeological Exploration in the Ryazan District in 2008. *Scientific Archive of the Ryazan Historical and Architectural Museum and Reserve*. 2009. №3991. (*In Russ.*)

Bulankin V.M., Zavyalov V.I., Ivanov D.A. Settlement Istye-2 — Raw Material Base of Staraya Ryazan. In: *The Archaeology of the Moscow Region*. No 8. Moscow : IA RAN, 2012. P. 166–174. (*In Russ.*)

Voyloshnikov V.D., Voyloshnikova N.A. Mineral Resources of the Ryazan Region and the Problem of Their Study. In: *Ryazan Region. History. Nature. Economy (to the 900<sup>th</sup> anniversary of the city of Ryazan)*. Ryazan : Ryazanskoe otdelenie Sovetskogo fonda kul'tury, 1991. P. 194–207. (*In Russ.*)

Gurin M.F. The Ancient Iron of the Byelorussian Dnieper Region. Minsk : Nauka i tehnika, 1982. 126 p. (*In Russ.*)

Gurin M.F. The Blacksmith's Craft in Polock Land 9<sup>th</sup> –13<sup>th</sup> cc. Minsk : Nauka i tehnika, 1987. 151 p. (*In Russ.*)

Zavyalov V.I., Terekhova N.N. Blacksmith's Craft of the Ryazan Principality. Moscow : IA RAN, 2013. 272 p. (*In Russ.*)

Ivanov D.A. Nozzles from Russian Production Settlement Istye-2. In: The Archaeology of the Moscow Region. No 13. Moscow : IA RAN, 2017. P. 88–98. (*In Russ.*)

Ivanov D.A., Strikalov I.Yu., Chelyapov V.P. Settlement Structures in the Rivers Pronya and Ranova interfluve. In: Great Principality of Ryazan. Moscow : Pamyatniki istoricheskoy mysli, 2005. P. 336–360. (*In Russ.*)

Kolchin B.A., Krug O.Yu. Physical Modeling of the Bloomer Process. In: Archeology and natural sciences. Moscow : Nauka, 1965. P. 196–215. (*In Russ.*)

Mongayt A.L. The Report about Investigations of the Ryazan Party of the Srednerusskaya Expedition in 1955. Archiv of Institute of Archaeology Russian Academy of Sciences. R-1, №1205. (*In Russ.*)

Naumov A.N., Naumova T.V., Shmelev V.N. Unique Find of the Metallurgical Complex of the 14<sup>th</sup> c. at Kulikovo Pole. In: The City of the Middle Ages and Early Modern Times. IV. Archaeology. History. Tula : Gosudarstvennyj muzej-zapovednik "Kulikovo pole", 2018. P. 81–102. (*In Russ.*)

Rabinovich M.G. The Great Posad of Moscow (Results of the works of Moscow expedition [1949]). *Vesti AN SSSR = News of the Academy of Sciences of the USSR*. 1950;9:113–120. (*In Russ.*)

Semykin Yu.A. Ironmaking and Ironworking at Bolgar Hillfort. In: The City of Bolgar. Handicraft of Metallurgists, Blacksmiths, Foundrymen. Kazan : Institut yazyka, literatury i istorii Akademii nauk Tatarstana, 1996. P. 89–153. (*In Russ.*)

Chelyapov V.P. Tolpino Hillfort and Its Vicinity. In: The Eastern European City in the Context of Ethno-cultural, Political and Settlement Structures. Ryazan : Ryazanskij istoriko-arhitekturnyj muzej-zapovednik, 2012. P. 160–161. (*In Russ.*)

Espelund A. Iron Metallurgy in Norway at an Early Stage of Development. *Rossiyskaya Arheologiya = Russian Archaeology*. 2010;3:44–50. (*In Russ.*)

Bachman H.-G. The Identification of Slags from Archaeological Sites. London : Institute of Archaeology, 1982. 77 p.

Crew P. Twenty-five Years of Bloomery Experiments. In: D. Dungworth and R.C.P. Doonan (eds). *Accidental and Experimental Archaeometallurgy*. London, 2013. Pp. 25–50.

Espelund A. Bloomery Ironmaking — Witness of Skill and Organization in the Past. In: Reports. International Symposium "Metallurgy in Southeast Europe from Ancient Times till the End of 19<sup>th</sup> Century". Sozopol : Nauchno-tekhnicheski s'uz po minno delo, geologiya i metalurgiya, 2005. Pp. 13–21.

Frankfort H. Early Iron in Iraq. *Man*. 1950. Pp. 50 - 100.

Hošek J., Merta J., Barák M. Metalografický rozbor železného polotovaru z tavby v rekonstrukci pece s tenkou hrudí provedené 14.5.2008 ve Staré Huti u Adamova. In: *Archeologia technical* 21. Brno : Technicke museum v Brne, 2010. S. 25–30.

Özgüç T. Early Anatolian Archaeology in the Light of Recent Research. *Anatolia*. 1963;7:1–21.

Pleiner R. Iron in Archaeology. The European Bloomery Smelters. Praha : Archeologický Ústav Akademie věd České Republiky, 2000. 400 p.; il.

Waldbaum J.C. From Bronze to Iron. Göteborg : Paul Åströms förlag, 1978. 106 p.

Waldbaum J.C. The First Archaeological Appearance of Iron and the Transition to the Iron Age. In: The Coming of the Age of Iron. New Haven and London : Yale University Press, 1980. Pp. 69–98.

Wang Q., Crew P. A Scientific Study of Bloomer Irons Experimentally Smelted from Different Ores. In: J. Humphris and T. Rehren (eds). The World of Iron. Proceedings of a Conference at the Natural History Museum. London : Archetype, 2013. Pp. 393–401.

Wertime T.A. The Beginnings of Metallurgy: *A New Look*. *Science*. 1973;182(30 Nov.):875–887.

---

### ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

---

**Завьялов В.И.:** проведение экспериментальных работ и аналитических исследований, написание соответствующего раздела статьи, подготовка иллюстративного материала.

**V.I. Zavyalov:** carrying out experimental works and analytical studies, writing the relevant section of the article, preparing illustrative material.

**Терехова Н.Н.:** обобщение и интерпретация аналитических данных, составление таблиц, написание соответствующего раздела статьи.

**N.N. Terekhova:** generalization and interpretation of analytical data, compilation of tables, writing the relevant section of the article.

Конфликт интересов отсутствует / There is no conflict of interest.

---

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

---

**Завьялов Владимир Игоревич,** доктор исторических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории естественно-научных методов Института археологии РАН, Москва, Россия.

**Vladimir I. Zavyalov,** Doctor of Historical Sciences, Leading Researcher Laboratory of Natural Sciences Institute of Archaeology RAS, Moscow, Russia.

**Терехова Наталия Николаевна,** кандидат исторических наук, старший научный сотрудник лаборатории естественно-научных методов Института археологии РАН, Москва, Россия.

**Nataliya N. Terekhova,** Candidate of Historical Sciences, Senior Researcher Laboratory of Natural Sciences Institute of Archaeology RAS, Moscow, Russia.

*Статья поступила в редакцию 22.05.2023;*

*одобрена после рецензирования 11.08.2023;*

*принята к публикации 14.08.2023.*

*The article was submitted 22.05.2023;*

*approved after reviewing 11.08.2023;*

*accepted for publication 14.08.2023.*