

MISCELLANEA

Научная статья
УДК 902/904
doi: 10.17223/2312461X/50/10

Междисциплинарный анализ металлургических объектов из археологических памятников

Владимир Игоревич Завьялов¹
Наталья Николаевна Терехова²

^{1,2} *Институт археологии РАН, Москва, Россия*
¹ *v_zavyalov@list.ru*

Аннотация. В последнее время при изучении археологических кузнечных артефактов начинают широко применяться такие методы, как рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Основываясь на проведённых нами исследованиях, предлагается алгоритм комплексного изучения продукции чёрной металлургии и железообработки. При этом рассматриваются три основных объекта исследования: сами железные предметы, шлаки (как металлургические, так и кузнечные), шлаковые включения в железных предметах. Делается вывод о том, что комплексный анализ металлургических объектов значительно расширяет границы познания особенностей и закономерностей металлургического производства.

Ключевые слова: археологический артефакт, археометаллография, рентгенофлуоресцентный анализ, сканирующая электронная микроскопия, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой

Благодарности: работа выполнена в рамках выполнения темы Минобрнауки «Междисциплинарные основы современных археологических исследований: теория и практика», № НИОКТР 126011315527-2.

Для цитирования: Завьялов В.И., Терехова Н.Н. Междисциплинарный анализ металлургических объектов из археологических памятников // Сибирские исторические исследования. 2025. № 4. С. 214–229. doi: 10.17223/2312461X/50/10

Original article
doi: 10.17223/2312461X/50/10

Interdisciplinary Analysis of Metallurgical Objects from Archaeological Sites

Vladimir I. Zavyalov¹, Natalia N. Terekhova²

^{1,2} *Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
¹ *v_zavyalov@list.ru*

Abstract. Recently, such methods as X-ray fluorescence analysis (XRF), scanning electron microscopy (SEM) and inductively coupled plasma mass spectrometry

(ICP-MS) have begun to be widely used in the study of archaeological forging artifacts. In this article, based on our research, we propose an algorithm for a comprehensive study of ferrous metallurgy and ironworking products. In this case, three main objects of study are considered: iron objects themselves, slags (both metallurgical and forging), slag inclusions in iron objects. As a result, a conclusion is made that a comprehensive analysis of metallurgical objects significantly expands the boundaries of knowledge of the features and patterns of metallurgical production.

Keywords: archaeological artifact, archaeometallography, X-ray fluorescence analysis, scanning electron microscopy, inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the Ministry of Education and Science's project "Interdisciplinary Foundations of Modern Archaeological Research: Theory and Practice" No. 126011315527-2.

For citation: Zavyalov, V.I. & Terekhova, N.N. (2025) Interdisciplinary Analysis of Metallurgical Objects from Archaeological Sites. *Sibirskie Istoricheskie Issledovaniia – Siberian Historical Research*. 4. pp. 214–229 (In Russian). doi: 10.17223/2312461X/50/10

Введение

Внедрение в археологию естественно-научных методов анализа значительно расширяет возможности интерпретации изучаемых археологических объектов.

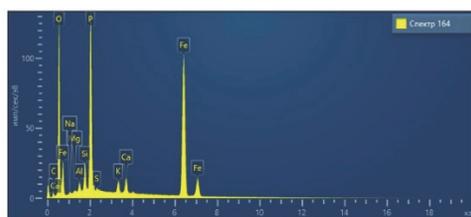
Наглядным примером является изучение изделий из чёрного металла. Уже в первой половине XX в. предпринимались первые попытки металлографического исследования археологических артефактов (Арендт 1936; Иесен, Деген-Ковалевский 1935; Сальдау, Гущина 1932; Desch 1929; Garland 1913). В середине столетия Б.А. Колчиным и Р. Тайлекотом были сформулированы основы принципы нового направления в археологии (Колчин 1953; Tylecote 1962). Методика интерпретации аналитических данных изучения чёрного металла была разработана в 90-х гг. XX в. авторским коллективом кабинета археометаллографии лаборатории естественно-научных методов Института археологии РАН (Завьялов, Терехова, Щербаков, 2024). Это позволило выявлять особенности и закономерности становления и формирования кузнечного ремесла у носителей конкретной культурно-исторической общности, определять роль традиций и инноваций в этой отрасли производства, раскрывать характер этнокультурных взаимодействий. В последнее время при исследовании кузнечных артефактов всё чаще начинают применяться такие методы, как рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС). Возникла необходимость детально рассмотреть возможности новых методов применительно в изучении истории чёрной металлургии и железообработки.

Методы

В основе РФА лежит эффект возбуждения атомов вещества при облучении образца гамма-излучением. Вторичное характеристическое излучение присутствующих в образце элементов регистрируется энергодисперсионным детектором (рис. 1). Применение данного метода позволяет проводить быстрый одновременный анализ как главных (матричных), так и следовых элементов. Суть метода СЭМ заключается в том, что на поверхность образца направляется электронный пучок энергиями электронов до 20–40 кэВ. Электронно-оптическая схема микроскопа фокусирует пучок в пятно размером в единицы микрон. Одним из процессов, происходящих при взаимодействии электронов с веществом, является возбуждение так называемого характеристического излучения, что позволяет изучать химический состав образца (рис. 2).



Рис. 1. Отображение химического состава образца на экране РФА-детектора



Элемент	Тип линии	Вес %	Сигма вес %	Атом, %	Оксид	Оксид %	Сигма % оксида
O	K-серия	35,69	0,13	60,59			
Na	K-серия	0,37	0,06	0,43	Na ₂ O	0,50	0,08
Mg	K-серия	0,17	0,04	0,19	MgO	0,29	0,07
Al	K-серия	0,87	0,04	0,87	Al ₂ O ₃	1,64	0,08
Si	K-серия	2,13	0,04	2,06	SiO ₂	4,55	0,09
P	K-серия	14,48	0,09	12,70	P ₂ O ₅	33,18	0,20
S	K-серия	0,16	0,03	0,14	SO ₃	0,41	0,08
K	K-серия	1,20	0,04	0,84	K ₂ O	1,45	0,04
Ca	K-серия	1,70	0,04	1,15	CaO	2,38	0,06
Fe	K-серия	43,22	0,15	21,02	FeO	55,61	0,19
Всего		100,00		100,00		100,00	

Рис. 2. Результат СЭМ-исследования образца

Возможно как проведение анализа в отдельных точках, размер которых зависит от исследуемого вещества и энергии электронов (как правило, не более 5–10 микрон), так и анализ сравнительно больших участков. Хотя существует множество аналитических методик исследования элементного состава, СЭМ/ЭДС (сканирующая электронная микроскопия проводится в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией, поэтому этот метод часто обозначается аббревиатурой СЭМ/ЭДС) является неразрушающим методом с высоким пространственным разрешением и дает возможность анализа конкретных участков (например, включений) сложных по строению образцов. С помощью метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) измеряется масса заряженных частиц (ионов) в веществе. Это позволяет определить, из каких атомов или молекул состоит образец, а также их концентрацию. Принцип исследования основан на разделении ионов по их массе и заряду, отличается высокой чувствительностью и способностью определять ряд элементов крайне низкой концентрации (одну частицу из 10^{12}).

Впервые методы РФА и СЭМ были применены к археологическим артефактам из цветного металла в 1960-х гг., когда в Университете Беркли была исследована серия монет Римской империи.

Изучение изделий из чёрного металла методами РФА и СЭМ в зарубежной археологии начались с конца XX в. Применительно к артефактам чёрной металлургии, как демонстрируют многочисленные исследования, РФА более результативен при исследовании состава металлургических и кузнечных шлаков, а СЭМ и ИСП-МС – при исследовании состава шлаковых включений в металле и самого металла изделий. В частности, французским коллегам при использовании этих методов удалось обосновать происхождение железного крепежа, использованного при строительстве позднесредневековых соборов, из разных рудопроявлений (Dillmann, L'Heritier 2007). Особенно важные данные при изучении методом СЭМ шлаковых включений в железных артефактах получили английские специалисты (Blakelock et al. 2009; Blakelock 2016). В итоге многочисленных исследований были сделаны выводы о том, что соотношения основных элементов в шлаковых включениях внутри отдельных объектов достаточно стабильны. С увеличением стекловидного компонента в шлаке с низким содержанием железа, как это можно обнаружить в перлитных структурах или феррите с высоким содержанием фосфора, эти соотношения становятся более изменчивыми. В настоящее время нет удовлетворительного объяснения этому наблюдению, но оно, вероятно, указывает на более высокие температуры плавки и более восстановительную атмосферу. Стекловидные включения шлака в сильно науглероженных зонах и во всех стальных изделиях показывают повышенные концентрации следовых элементов. Сравнивая валовой анализ шлака с

рудами из минерализации только с одним типом руды, становится очевидным, что определенные соотношения элементов не изменяются существенно во время плавки (Schwab et al. 2006: 442).

Статистическая обработка данных по содержанию в артефактах основных и следовых элементов, полученных при ИСП-МС анализе, предоставляет значимую информацию для оценки возможности того, что железные предметы были изготовлены с использованием руды из определенной области (Desautly et al. 2009; Dillmann et al. 2017).

Ещё одним методом, который начинает активно использоваться при изучении объектов культурного наследия, является рамановская спектроскопия – неразрушающий метод изучения молекулярной структуры вещества. Применительно к чёрному металлу с помощью этого метода возможно исследовать продукты коррозии, что предоставит существенную информацию для реставрации и консервации артефактов (Bellot-Gurlet et al. 2009). Кроме того, рамановский метод позволяет определять типы руды (лимонит, гематит, сидерит и т.д.).

В отечественных археологических исследованиях метод РФА впервые был применён при изучении изделий из цветных металлов в 1990-х гг. (работы Р.А. Митояна, Н.В. Ениосовой, Т.Г. Сарачевой, И.Е. Зайцевой). Что касается чёрного металла, то в российском научном сообществе долгое время бытовало мнение о малой информативности химического состава железных артефактов. В связи с этим применение РФА при исследовании кузнечных изделий из чёрного металла до недавнего времени носило спорадический характер. Действительно, археологическое железо представляется химически «чистым» в силу способа его получения, когда металл не расплавляется, а восстанавливается в твёрдом состоянии. С точки зрения исследуемых объектов, элементами, способными соединяться с железом при сыродутном процессе и оказывать существенное влияние на его свойства, являются углерод и фосфор. Вместе с тем примесные элементы, содержащиеся в руде, переходят в металлургический шлак и шлаковые включения, которые в значительном количестве присутствуют в древнем железе. Это наблюдение позволило прийти к выводу, что исследование химического состава шлаков и шлаковых включений несёт значительную информацию о рудном источнике, особенностях протекания сыродутного процесса. В конечном итоге становится возможным выделить серии железных артефактов, изготовленных в одном месте или из руды одного рудопроявления. Это, в свою очередь, предоставляет значимую информацию для выделения технологических и экономических связей между мастерами различных памятников.

В настоящее время такие методы, как СЭМ и РФА, всё активнее применяются в российской науке при исследовании железных шлаков.

В частности, нами был проведён анализ шлаков из поселения Стаево (Гошек, Завьялов 2018), памятников Рязанской земли (Гошек, Завьялов 2017) и Подмосковья (Завьялов, Терехова 2023).

Изучению химического состава шлаков большое внимание уделяется в работах коллектива авторов под руководством Е.В. Водясова (Водясов, Зайцева 2020; Vodyasov et al. 2021). В результате использования ИСП-МС при анализе железной руды и шлаков из памятников Юго-Восточного Алтая гуннского времени была выделена группа поселений, металлурги которых использовали руду из рудопроявления Рудный Лог, и ряд памятников, мастера которых работали на других рудах (Vodyasov et al. 2023).

Однако приходится констатировать, что исследования железных артефактов с использованием перечисленных методов ещё крайне малочисленны, что не позволяет проводить широкие обобщения об особенностях металлургического и кузнечного производств.

Несмотря на значительную информативность, электронная микроскопия и микроанализ требуют дополнения другими методами исследования. При этом все специалисты сходятся во мнении, что РФА и СЭМ анализы, по возможности, следует предварять металлографическими исследованиями.

Металлографический метод исследования железных предметов был внедрён в археологию Б.А. Колчиным (1949, 1953). В основе этого метода лежит микроструктурное исследование образцов, дополненное измерениями микротвёрдости различных структурных составляющих. Образцы вырезаются с рабочей части предмета ручным инструментом или с использованием прецизионного отрезного станка. Отобранный образец для удобства обработки заправляется в сплав Вуда или специальный пластик, шлифуется на наждачных бумагах и полируется окисью хрома или водной алмазной суспензией до зеркального блеска. Подготовленный таким образом образец – шлиф – протравливается реактивами ниталь (4% раствор азотной кислоты в этиловом спирте) и (или) Обергоффера, а затем изучается на металлографическом микроскопе. При этом определяются структуры металла, свидетельствующие о способах обработки заготовки, наличии сварных швов, характере шлаковых включений, зернистости феррита и т.д. Дополнением к структурному анализу является определение микротвёрдости отдельных структур, которая измеряется на микротвердомере алмазным пирамидальным индентором при нагрузке 100 г при времени измерения 10 с. Обработка полученных аналитических данных проводится по методике, разработанной в кабинете металлографии лаборатории естественно-научных методов Института археологии РАН (Завьялов, Терехова, Щербаков 2024: 20–22). В результате появляется возможность выявлять особенности и закономерности становления и формирования кузнечного ремесла у носителей конкретной культурно-исторической общности, определять роль традиций

и инноваций в этой отрасли производства, раскрывать характер этнокультурных взаимодействий.

Разумеется, все методы изучения археологических артефактов из чёрного металла имеют как свои достоинства, так и недостатки. К достоинствам металлографического метода относится, прежде всего, то, что это единственный способ, который позволяет делать выводы о приёмах изготовления артефакта, уровне квалификации мастера, изготовившего предмет. Главными недостатками метода являются необходимость пробоотбора, что нарушает целостность артефакта, и длительность подготовки образца. Эти недостатки особенно ощутимы, когда предполагается исследование музейных коллекций или уникальных находок.

Рентгенофлуоресценция, электронная микроскопия и масс-спектрометрия, как уже отмечалось, относятся к неразрушающим методам, но при их применении артефакт должен быть очищен от коррозии. К достоинствам методов относится быстрота получения результатов, а появление в последнее время переносных РФА-анализаторов позволяет проводить анализы вне лаборатории – в музеях и непосредственно в экспедициях. Но проведение исследований на электронном микроскопе и масс-спектрометре требует специального оборудования и квалифицированного персонала, способного интерпретировать полученные результаты, что, несомненно, увеличивает стоимость анализов. К недостаткам методов следует отнести сложность определения содержания ряда лёгких элементов, в том числе углерода. Содержание последнего крайне важно для анализа сталей. Полученные результаты могут быть представлены или в виде соотношения элементов, или их оксидов. Таким образом, РФА и СЭМ предоставляют возможность получить информацию, существенно дополняющую результаты традиционного металлографического метода.

Результаты

В настоящей статье, основываясь на проведённых нами исследованиях, мы предлагаем алгоритм комплексного изучения продукции чёрной металлургии и железообработки. При этом рассматриваются три основных объекта исследования: сами железные предметы, шлаки (как металлургические, так и кузнечные), шлаковые включения в железных предметах¹.

В результате археометаллографического исследования объекта выделяется технологическая схема его изготовления². Р. Тайлекотом и Б. Гилмором были предложены шесть основных типов технологических схем (Tylecote, Gilmour 1986). Следует отметить, что представленная английскими авторами типология во многом совпадает с технологическими схемами, выделенными Б.А. Колчиным (1953). В настоящее время эту

типологию технологических схем использует большинство специалистов. В наших работах мы также руководствуемся определениями технологических схем, основанными на разработках Б.А. Колчина, Р. Тайлекота и Б. Гилмора. В итоге мы выделяем шесть основных технологических схем (рис. 3): 1) целиком из железа – предметы, откованные из кричного железа (тип 0 по Tylecote, Gilmour 1986); 2) целиком из сырцово́й стали; 3) целиком из специально полученной цементированной стали (тип 1 по Tylecote, Gilmour 1986); 4) цементация; 5) трёхслойный пакет (тип 4 по Tylecote, Gilmour 1986); 6) наварка (тип 2 по Tylecote, Gilmour 1986). Выделяемые нами технологические схемы 2 и 4 в типологии Р. Тайлекота и Б. Гилмора отсутствуют (Завьялов и др. 2024: 20–21).

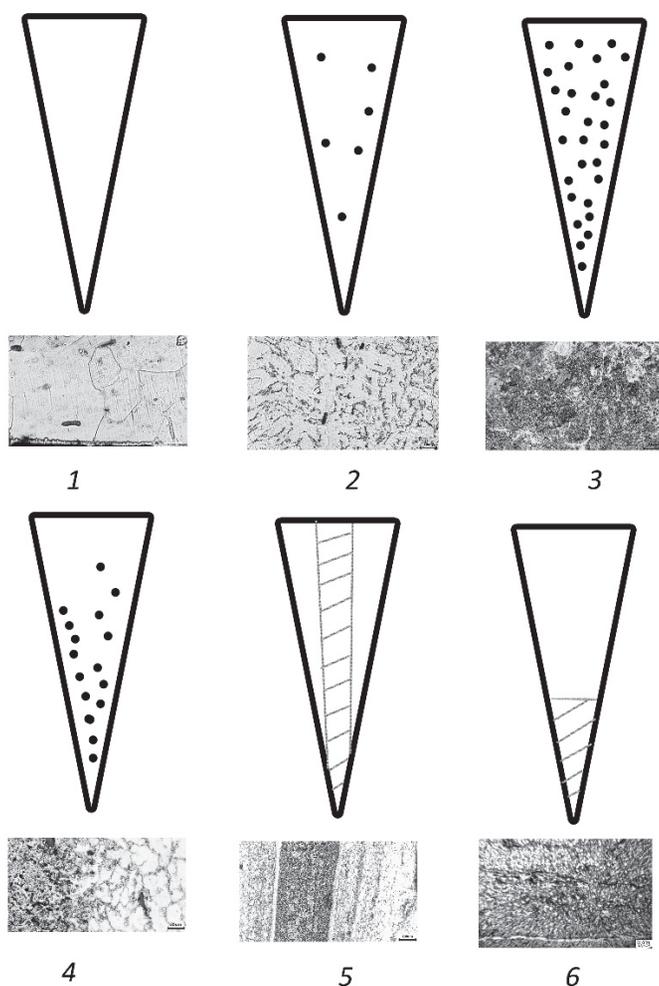


Рис. 3. Типы технологических схем и их микрофотографии

Следующим этапом исследования является определение химического состава самого металла и шлаковых включений в металле. Эти работы проводились с помощью сканирующего электронного микроскопа.

Результаты СЭМ анализа чёрного металла древних артефактов продемонстрировали, как и следовало ожидать, чистоту железа от примесных элементов. Единственным элементом, присутствующим в железе (за исключением углерода, который не определяется методом СЭМ), оказался фосфор. Фосфор – естественная примесь, переходящая в металл из железной руды. Он придает железу специфические свойства: твёрдость, сопротивление коррозии. В настоящее время общеизвестно, что некоторые виды фосфористого железа (при содержании фосфора в металле свыше 0,1%) в прошлом высоко ценились, в частности, за возможность хорошо свариваться с высокоуглеродистой сталью и повышенную устойчивость к коррозии. Опытный кузнец легко мог отличить их невооруженным глазом (при определенных условиях) от нефосфористого железа и стали (Thiele, Nosek 2015: 114). До недавнего времени высокое содержание фосфора в железе определялось по повышенной микротвёрдости феррита. Но, разумеется, СЭМ анализ для этих целей более надёжен и адекватен.

Анализ состава шлаковых включений позволил выявить два основных их типа. Первый представлен однофазными, преимущественно вытянутыми включениями чёрного цвета (рис. 4, 1). В их основе оксид кремния с незначительной (до 8%) примесью оксида железа. Подобные включения были выделены при микроструктурном исследовании Е. Пясковским в тип А (Piaskowski 1976: 65). К. Сенковский, изучив состав шлаковых включений, определил, что такие шлаковые включения представляют сложный оксид кремния (Sękowski 1978: 146). Это, если можно так выразиться, вторичные (в отличие от шлаковых включений, попавших в металл в ходе сыродутного процесса) шлаковые включения, которые образуются в железных артефактах на более поздних стадиях обработки, например, при складывании или сварке заготовки во времяковки (Blakelock et al. 2009: 1746). Появление в металле таких шлаковых включений наглядно демонстрируется практикой современных экспериментаторов, когда при ковке используется песчаный флюс, который реагирует с магнетитом (Fe_3O_4) и образует жидкий шлак (Fe_2SiO_4). Такая практика позволяет очистить поверхность от возникающей окалины и предотвратить дальнейшее окисление металла. При этом часть шлака неизбежно останется, образуя новые включения, особенно вдоль поверхностей сварных швов (Charlton et al. 2013: 2282).

Второй тип шлаковых включений представлен многофазовыми включениями неправильных форм с дендритами и глобулами светло- и тёмносерых цветов (рис. 4, 2). Эти включения состоят в основном из фаялита (силикат железа) и вюститита (оксид железа).

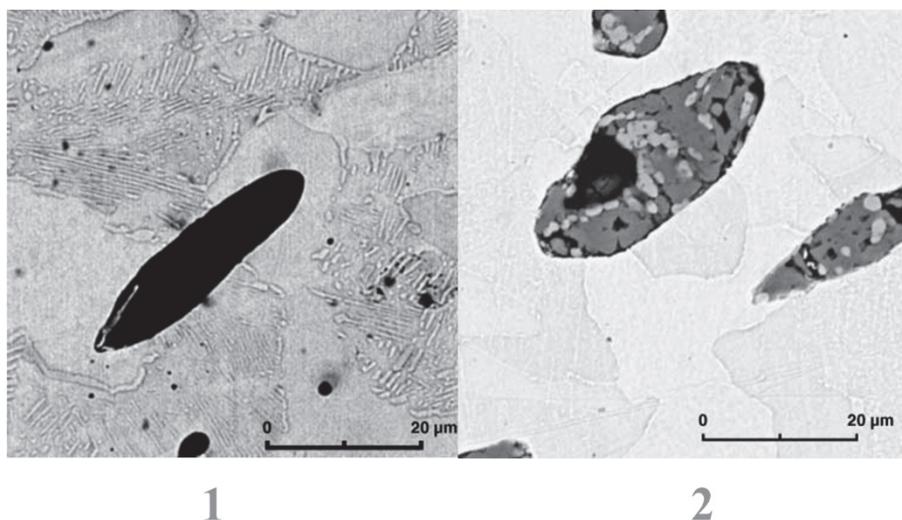


Рис. 4. Типы шлаковых включений: 1 – однофазные; 2 – многофазные

Как правило, они содержат большинство микропримесей, переходящих в процессе плавки из руды в шлак. Установлено, что основными микропримесями железных руд (кроме кремния и алюминия, составляющих основу пустой породы) являются фосфор, марганец, магний, реже титан, медь, никель, кобальт, сера, мышьяк. Особо следует остановиться на таких элементах, как калий и кальций, содержащихся в шлаке в сравнительно большом количестве (от 2–8% и выше). Многочисленные исследования показали, что эти элементы не обязательно содержатся в руде в больших концентрациях, но могут попадать в шлак из топлива и обмазки горнов (Crew 2000, 2007; Pleiner 2000: 252).

Проведение в дальнейшем сравнительного анализ соотношения микропримесей в шлаковых включениях позволяет высказать предположение о сходстве или различии железорудных источников, использовавшихся для получения металла различных памятников.

Наконец, ещё одной составляющей комплексного изучения истории железоделательного производства является исследование химического состава металлургических шлаков, которые традиционно являются одним из основных источников реконструкции химических процессов, происходивших во время производства сыродутного железа в горнах (Колчин 1953: 40–42; Наумов 2008: 104; Сунчугашев 1979: 56–58). В настоящее время исследование состава шлаков проводится как с помощью РФА, так и с помощью СЭМ. Следует учитывать, что в подавляющем большинстве случаев шлак является единственным свидетельством существования древней металлургии, тогда как остатки самих ме-

таллургических объектов – достаточно большая редкость (Водясов, Зайцева 2010: 401). В результате этих исследований становится доступной информация об особенностях рудного источника, характере металлургического процесса.

Заключение

Разумеется, получение сколько-нибудь значимых выводов возможно только при проведении статистически значимой серии анализов. При этом для обработки большого массива данных необходимым является применение математических методов. Подобный анализ часто основан на построении математических моделей при помощи методов кластеризации, классификации, регрессии, факторного анализа данных и т.д.

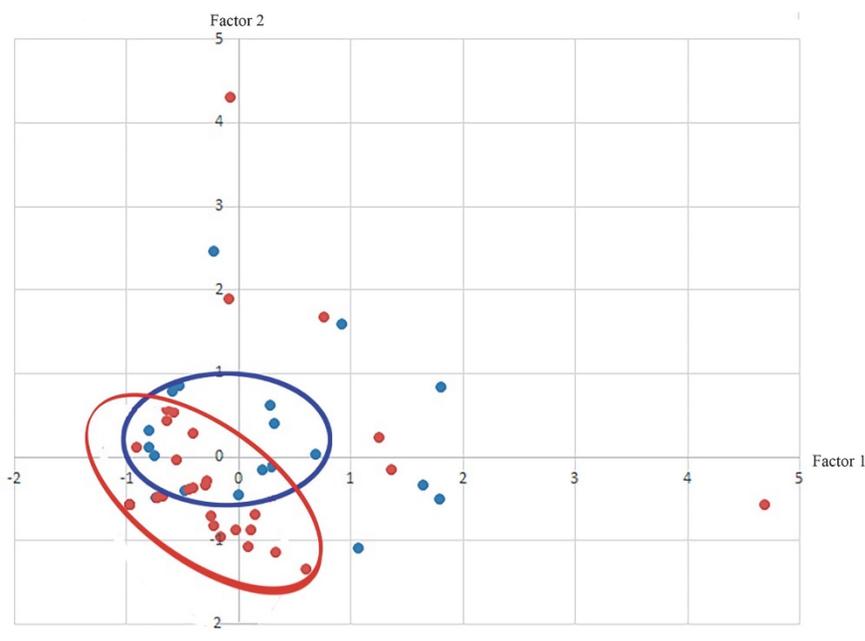


Рис. 5. Результаты факторного анализа химического состава шлаковых включений в железных предметах из селищ Мякинино 1 и Мякинино 2, демонстрирующие группы изделий, сходных и различных по химическому составу шлаковых включений

Модель имитирует некоторый процесс, например, динамику изменения в пространстве и (или) во времени какого-либо признака или набора признаков исследуемых образцов. Ее можно использовать для объяснения причин изменчивости признаков, оценки их значимости, моделирования различных вариантов развития данной изменчивости и т.п. Необходимо

учитывать, что математический анализ в археологии, как и в любой другой области его применения, может лишь выявить количественные закономерности в исследуемом массиве данных, однако качественная интерпретация полученных результатов должна всегда оставаться за специалистом-археологом. В настоящее время существует ряд аналитических платформ, позволяющих строить математические модели. Среди них можно выделить такие программы, как Deductor, Loginom, и др. Их функционал позволяет не только проводить математический анализ данных, но и визуализировать полученный результат в виде графиков, диаграмм, гистограмм, деревьев, карт, кубов и т.д., что значительно облегчает процесс дальнейшей интерпретации полученной информации (см. рис. 5).

Предложенный алгоритм исследования был применён нами, в частности, при изучении металлургической продукции из поселения X–XI вв. Горожане (Псковская обл.). В итоге был сделан вывод о сложном характере местного ремесленного производства. Металлурги поселения при получении железа и стали целенаправленно использовались руды с различными характеристиками. Особенностью местного кузнечного ремесла было применение трёхслойной технологии в восточноевропейском варианте, что, несомненно, свидетельствует о местном, а не привозном происхождении изделий (Завьялов, Терехова 2026).

Таким образом, комплексный анализ металлургических объектов значительно расширяет границы познания особенностей и закономерностей металлургического производства.

Примечания

¹ Металлографические анализы проводились в лаборатории естественнонаучных методов Института археологии РАН; рентгенофлуоресцентные исследования – в Институте археологии Чешской академии наук (Прага), Институте физической химии и электрохимии РАН, Центре коллективного пользования Института археологии РАН; СЭМ/ЭДС исследования – на кафедре археологии Исторического факультета МГУ и в Центре коллективного пользования Института археологии РАН. Авторы приносят глубокую благодарность за оказанную помощь д-ру И. Гошкеку, д.х.н. А.А. Ширяеву, к.и.н. Н.В. Ениосовой, к.и.н. И.А. Сапрыкиной, Е.Я. Зубавичусу.

² Под технологической схемой понимается последовательность основных кузнечных приёмов, применявшихся при изготовлении артефакта.

Список источников

- Арендт В.В.* О технике древнего клинкового производства // Архив истории науки и техники. 1936. Вып. 8. С. 161–188.
- Водясов Е.В., Зайцева О.В.* Металлургический шлак как археологический источник: проблемы и перспективы изучения // Культура как система в историческом контексте: Опыт Западно-Сибирских археолого-этнографических совещаний. Томск: Аграф-Пресс, 2010. С. 400–403.
- Водясов Е.В., Зайцева О.В.* Древнейшие памятники черной металлургии в Горном Алтае: новые данные из долины реки Юстыд // Сибирские исторические исследования. 2020. № 2. С. 125–147. doi: 10.17223/2312461X/28/9

- Гошек И., Завьялов В.И. Химический состав металлургических артефактов из поселения Ставо-4 // Древности. Исследования. Проблемы. Кишинёв; Тирасполь, 2018. С. 381–383.
- Гошек И., Завьялов В.И. Характеристика рудных источников эпохи средневековья по результатам рентгенофлуорисцентного анализа // Аналитические исследования лабораторий естественнонаучных методов. Вып. 4. М.: Таус, 2017. С. 167–174.
- Завьялов В.И., Терехова Н.Н. Технологические особенности кузнечной продукции из Подмосковных селищ XIV–XV вв. // Российская археология. 2023. № 3. С. 114–120.
- Завьялов В.И., Терехова Н.Н. Комплексный анализ кузнечной продукции из поселения Горожане // Российская археология. 2026. (В печати).
- Завьялов В.И., Терехова Н.Н., Щербаков В.Л. Металлургия и железообработка на сельских поселениях Древней Руси. М.: Таус, 2024. 216 с.
- Иссен А.А., Деген-Ковалевский Б.Е. Из истории древней металлургии Кавказа. М.; Л.: Соцэкгиз, 1935. С. 7–237 (Известия ГАИМК. Вып. 120).
- Колчин Б.А. Опыт металлографического исследования древнерусских железных вещей // КСИИМК. 1949. Вып. XXX. С. 42–53.
- Колчин Б.А. Чёрная металлургия и металлообработка в Древней Руси. М.: АН СССР, 1953. 280 с. (МИА № 32).
- Наумов А.Н. Чёрная металлургия и железообработка на сельских памятниках Куликова поля в конце XII – третьей четверти XIV вв. Тула: Государственный музей-заповедник «Куликово поле», 2008. 225 с.
- Сальдау П.Я., Гущина А.Ф. Применение металлографии в археологии // Сообщения ГАИМК. 1932. Вып. 3-4. С. 49–51.
- Сунчугашев Я.И. Древняя металлургия Хакасии. Эпоха железа. Новосибирск: Наука, 1979. 192 с.
- Bellot-Gurlet L., Neff D., Reguer S., Monnier J., Saheb M. Raman studies of corrosion layers formed on archaeological irons in various media // Journal of Nano Research, Trans Tech Publications. 2009. 8. P. 147–156.
- Blakelock E. Metallographic examination of early medieval knives from the UK // Historical Metallurgy. 2016. Vol. 50. Pt 2. P. 85–94.
- Blakelock E., Martín-Torres M., Veldhuijzen H.A., Young T. Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study // JAS. 2009. 36. P. 1745–1757.
- Charlton M.F., Shennan S.J., Rehren T., Crew P. Evolutionary analysis of ironmaking slag // The world of iron. London: Archetype Publications, 2013. P. 288–295.
- Crew P. The influence of clay and charcoal ash on bloomery slags // Il ferro nelle Alpi. Proceedings of the Conference. Bienna, Italy, 2000. P. 38–48.
- Crew P. CaO enrichment in slags: the influence of fluxing or of fuel ash? // Poster presented at the Early Ironworking in Europe II conference, Plas Tan y Bwlch, England. 2007.
- Desch C. Reports on the Metallurgical Examination of Specimens for the Sumerian Committee of the British Association // Reports of the British Association for the Advancements of Science. 1929.
- Desautly A.-M., Dillmann P., L'Héritiera M., Mariet C., Gratuze B., Joron J.-L., Fluzin P. Does it come from the Pays de Bray? Examination of an origin hypothesis for the ferrous reinforcements used in French medieval churches using major and trace element analyses // Journal of Archaeological Science. 2009. 36. P. 2445–2462.
- Dillmann P., L'Héritier M. Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes // Journal of Archaeological Science. 2007. 34. P. 1810–1823.
- Dillmann P., Schwab R., Bauvais S., Brauns M., Disser A., Leroy S., Gassmann G., Fluzin P. Circulation of iron products in the North-Alpine area during the end of the first Iron Age (6th–5th c. BC): A combination of chemical and isotopic approaches // Journal of Archaeological Science. 2017. 87. P. 108–124.

- Garland H. Egyptian Metal Antiquities // The Journal of the Institute of Metals. London. 1913. Vol. X. P. 329–343.
- Piaskowski J. Classification of the structures of slag inclusions in early iron objects made of bloomery iron // Archaeologia Polona. 1976. 17. S. 139–149.
- Pleiner R. Iron in Archaeology. The European Bloomery Smelters. Praha: Archeologický Ústav AV ČR, 2000. 400 p.
- Schwab R., Heger D., Höppner B., Pernicka E. The provenance of iron artefacts from Manching: a multi-technique approach // Archaeometry. 2006. 48. P. 433–452.
- Sękowski K. Skład chemiczny wtrąceń żużla w dawnych wyrobach z żelaza dymarskiego // Studia i materiały z dziejów nauki Polskiej. 1978. Seria D. Z. 9. S. 133–147.
- Thiele A., Hosek J. Estimation of Phosphorus Content in Archaeological Iron Objects by Means of Optical Metallography and Hardness Measurements // Acta Polytechnica Hungarica. 2015. Vol. 12, No. 4. P. 113–126.
- Tylecote R.F. Metallurgy in Archaeology. A prehistory of metallurgy in the British Isles. London: Edward Arnold, 1962. 368 p.
- Tylecote R.F., Gilmour B.J.J. The Metallography of Early Ferrous Edge Tools and Edged Weapons // British Archaeological Reports. 1986. 155. 264 p.
- Vodyasov E.V., Stepanov I.S., Sadykov T.R., Asochakova E.M., Rabtsevich E.S., Zaitceva O.V., Blinov I.A. Iron metallurgy of the Xainbei period in Tuva (Southern Siberia) // Journal of Archaeological Science. 2021. 39. P. 1–17.
- Vodyasov E.V., Stepanov I.S., Vavulin M.V., Zaitceva O.V., Ebel A.V., Asochakova E.M., Pushkarev A.A., Rabtsevich E.S., Rassomakhin M.A. Large-scale mining and smelting of specularite ores 2 in the Altai Mountains during the 1st millennium AD // Journal of Archaeological Science. 2023. 158, 105838.
- Zavyalov V.I., Terekhova N.N. Results of Archaeometallographic Studies of Iron Items from Ancient Rus Settlements in the Moscow Region // Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy Proceedings of 9th Geoarchaeological Conference, Miass, Russia, 19–22 September 2022. 2023. P. 264–274.

References

- Arendt V.V. (1936) O tekhnike drevnego klinkovogo proizvodstva [On the technique of ancient blade production]. *Arkhiv istorii nauki i tekhniki*. Vol. 8. pp. 161–188.
- Bellot-Gurlet L., Neff D., Reguer S., Monnier J., Saheb M. (2009) Raman studies of corrosion layers formed on archaeological irons in various media. *Journal of Nano Research, Trans Tech Publications*. 2009. 8. pp. 147–156.
- Blakelock E. (2016) Metallographic examination of early medieval knives from the UK. *Historical Metallurgy*. Vol. 50. Part 2. pp. 85–94.
- Blakelock E., Martínón-Torres M., Veldhuijzen H.A., Young T. (2009) Slag inclusions in iron objects and the quest for provenance: an experiment and a case study. *JAS*. 36. pp. 1745–1757.
- Charlton M.F., Shennan S.J., Rehren T., Crew P. (2013) Evolutionary analysis of ironmaking slag. *The world of iron*. London: Archetype Publications. pp. 288–295.
- Crew P. (2000) The influence of clay and charcoal ash on bloomery slags. *Il ferro nelle Alpi. Proceedings of the Conference*. Bienna, Italy. pp. 38–48.
- Crew P. (2007) *CaO enrichment in slags: the influence of fluxing or of fuel ash?* Poster presented at the Early Ironworking in Europe II conference, Plas Tan y Bwlch, England.
- Desaulty A.-M., Dillmann P., L'Héritiera M., Mariet C., Gratuze B., Joron J.-L., Fluzin P. (2009) Does it come from the Pays de Bray? Examination of an origin hypothesis for the ferrous reinforcements used in French medieval churches using major and trace element analyses. *Journal of Archaeological Science*. 36. pp. 2445–2462.

- Desch C. (1929) Reports on the Metallurgical Examination of Specimens for the Sumerian Committee of the British Association. *Reports of the British Association for the Advancements of Science*.
- Dillmann P., L'Héritier M. (2007) Slag inclusion analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings: supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science*. 34. pp. 1810–1823.
- Dillmann P., Schwab R., Bauvais S., Brauns M., Disser A., Leroy S, Gassmann G., Fluzin P. (2017) Circulation of iron products in the North-Alpine area during the end of the first Iron Age (6th–5th c. BC): A combination of chemical and isotopic approaches. *Journal of Archaeological Science*. 87. pp. 108–124.
- Garland H. (1913) Egyptian Metal Antiquities. *The Journal of the Institute of Metals*. London. Vol. X. pp. 329–343.
- Goshek I., Zavyalov V.I. (2017) Kharakteristika rudnykh istochnikov epokhi srednevekov'ia po rezul'tatam rentgenofluoristsentnogo analiza [Characteristics of medieval ore sources based on X-ray fluorescence analysis]. In: *Analiticheskie issledovaniia laboratorii estestvennonauchnykh metodov* [Analytical research of the laboratory of natural science methods]. Vol. 4. Moscow: Taus. pp. 167–174.
- Goshek I., Zavyalov V.I. (2018) Khimicheskii sostav metallurgicheskikh artefaktov iz poseleniia Staevo-4 [Chemical composition of metallurgical artifacts from the Staevo-4 settlement]. In: *Drevnosti. Issledovaniia. Problemy* [Antiquities. Research. Problems]. Kishinev-Tiraspol'. pp. 381–383.
- Iessen A.A., Degen-Kovalevskii B.E. (1935) *Iz istorii drevnei metallurgii Kavkaza* [From the history of ancient metallurgy of the Caucasus]. Moscow; Leningrad: Sotsekgiz. pp. 7–237 (Izvestiia GAIMK. Vol. 120).
- Kolchin B.A. (1949) Opyt metallograficheskogo issledovaniia drevnerusskikh zheleznykh veshchei [The experience of metallographic research of ancient Russian iron objects]. *KSIIMK*. Vol. XXX. pp. 42–53.
- Kolchin B.A. (1953) *Chernaia metallurgii i metalloobrabotka v Drevnei Rusi* [Ferrous metallurgy and metalworking in Ancient Rus']. Moscow: AN SSSR. 280 s. (MIA № 32).
- Naumov A.N. (2008) *Chernaia metallurgii i zhelezoobrabotka na sel'skikh pamiatnikakh Kulikova polia v kontse XII – tret'ei chetverti XIV vv.* [Ferrous metallurgy and ironworking at the rural sites of Kulikovo Field in the late 12th – third quarter of the 14th centuries]. Tula: Gosudarstvennyi muzei-zapovednik «Kulikovo pole».
- Piaskowski J. (1976) Classification of the structures of slag inclusions in early iron objects made of bloomery iron. *Archaeologia Polona*. 17. pp. 139–149.
- Pleiner R. (2000) *Iron in Archaeology. The European Bloomery Smelters*. Praha: Archeologický Ústav AV ČR.
- Sal'dau P.Ia., Gushchina A.F. (1932) Primenenie metallografii v arkheologii [Application of metallography in archaeology]. *Soobshcheniia GAIMK*. Vol. 3-4. pp. 49–51.
- Schwab R., Heger D., Höppner B. and Pernicka E. (2006) The provenance of iron artefacts from Manching: a multi-technique approach. *Archaeometry*. 48. pp. 433–452.
- Sękowski K. (1978) Skład chemiczny wtrąceń żużła w dawnych wyrobach z żelaza dymarskiego. *Studia i materiały z dziejów nauki Polskiej*. Seria D. Z. 9. pp. 133–147.
- Sunchugashev Ia.I. (1979) *Drevniia metallurgii Khakasii. Epokha zheleza* [Ancient metallurgy of Khakassia. The Iron Age]. Novosibirsk: Nauka.
- Thiele A., Hosek J. (2015) Estimation of Phosphorus Content in Archaeological Iron Objects by Means of Optical Metallography and Hardness Measurements. *Acta Polytechnica Hungarica*. Vol. 12, No. 4. pp. 113–126.
- Tylecote R.F. (1962) *Metallurgy in Archaeology. A prehistory of metallurgy in the British Isles*. London: Edward Arnold.
- Tylecote R.F., Gilmour B.J.J. (1986) The Metallography of Early Ferrous Edge Tools and Edged Weapons. *British Archaeological Reports*. 155.

- Vodiasov E.V., Zaitseva O.V. (2010) Metallurgicheskii shlak kak arkhеologicheskii istochnik: problemy i perspektivy izucheniia [Metallurgical slag as an archaeological source: problems and prospects of study]. In: *Kul'tura kak sistema v istoricheskom kontekste: Opyt Zapadno-Sibirskikh arkhеologo-etnograficheskikh soveshchani* [Culture as a system in a historical context: The experience of the West Siberian archaeological and ethnographic meetings]. Tomsk: Agraf-Press. pp. 400–403.
- Vodiasov E.V., Zaitseva O.V. (2020) The Earliest Iron Smelting Sites in the Altai Republic: New Data from the Yustyd River Valley. *Sibirskie istoricheskie issledovaniia – Siberian Historical Research*. 2. pp. 125–147. DOI: 10.17223/2312461X/28/9
- Vodyasov E.V., Stepanov I.S., Sadykov T.R., Asochakova E.M., Rabtsevich E.S., Zaitseva O.V., Blinov I.A. (2021) Iron metallurgy of the Xainbei period in Tuva (Southern Siberia). *Journal of Archaeological Science*. 39. pp. 1–17.
- Vodyasov E.V., Stepanov I.S., Vavulin M.V., Zaitseva O.V., Ebel A.V., Asochakova E.M., Pushkarev A.A., Rabtsevich E.S., Rassomakhin M.A. (2023) Large-scale mining and smelting of specularite ores 2 in the Altai Mountains during the 1st millennium AD. *Journal of Archaeological Science*. 158. 105838.
- Zavyalov V.I., Terekhova N.N. (2023) Results of Archaeometallographic Studies of Iron Items from Ancient Rus Settlements in the Moscow Region. *Geoarchaeology and Archaeological Mineralogy Proceedings of 9th Geoarchaeological Conference, Miass, Russia, 19–22 September 2022*. pp. 264–274.
- Zavyalov V.I., Terekhova N.N. (2023) Tekhnologicheskie osobennosti kuznechnoi produktsii iz Podmoskovnykh selishch XIV–XV vv. [Technological Features of Smithery Products from Moscow Settlements of the 14th–15th Centuries]. *Rossiiskaia arkhеologiia*. 3. pp. 114–120.
- Zavyalov V.I., Terekhova N.N. (2026) Kompleksnyi analiz kuznechnoi produktsii iz poseleniia Gorozhane [A comprehensive analysis of blacksmith products from the settlement of Gorodzhane]. *Rossiiskaia arkhеologiia*. (In print).
- Zavyalov V.I., Terekhova N.N., Shcherbakov V.L. (2024) *Metallurgiiia i zhelezoobrabotka na sel'skikh poseleniakh Drevnei Rusi* [Metallurgy and ironworking in rural settlements of Ancient Rus']. Moscow: Taus.

Сведения об авторах:

ЗАВЬЯЛОВ Владимир Игоревич – доктор исторических наук, ведущий научный сотрудник, Институт археологии РАН (Москва, Россия). E-mail: v_zavyalov@list.ru
ТЕРЕХОВА Наталия Николаевна – кандидат исторических наук, старший научный сотрудник, Институт археологии РАН (Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Vladimir I. Zavyalov, Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation). E-mail: v_zavyalov@list.ru
Natalia N. Terekhova, Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation).

The authors declare no conflict of interests.

*Статья поступила в редакцию 8 апреля 2025;
принята к публикации 28 июля 2025.*

*The article was submitted 08.04.2025;
accepted for publication 28.07.2025.*