

ИНТЕРПРЕТИРУЕМАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ И МИКРОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ШЛАКОВ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ ЭПОХИ ПОЗДНЕЙ БРОНЗЫ

Николаев Владимир Дмитриевич

Аспирант кафедры истории, археологии и этнографии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Кравцова Елизавета Игоревна

Студентка магистратуры кафедры отечественной истории и археологии
Тюменский государственный университет
г. Тюмень, Российская Федерация

Аннотация

В представленной исследовательской работе изложен дисциплинарный подход к реконструкции древних металлургических производств и очагов металлообработки позднебронзового века на территории Урало-Западносибирского региона. Литые бронзовые орудия, украшения, а также производственные отходы (шлаки, сплески, шлакованные сопла) выступают ключевыми источниками информации о степени развития древних технологий, источниках рудного сырья и торговых магистральных. Авторами сформирована гибридная классификационная модель на основе нейронной сети прямого распространения и градиентного бустинга, позволяющая дифференцировать рудные источники и рецептуры сплавов по микроэлементному составу и фазовым включениям. Для преодоления проблемы черного ящика в модель встроен алгоритм расчета Shapley-значений, который количественно оценивает вклад примесей мышьяка, сурьмы, никеля и серебра в выводы о происхождении металла. Исследование микроструктуры шлаковых корок методом сканирующей электронной микроскопии подтвердило корректность нейросетевых оценок температурных режимов древней плавки.

Ключевые слова: древняя история, археология, бронзовый век, древняя металлургия, микрорентгеноспектральный анализ, металлография, Shapley-значения, машинное обучение, рецептура сплавов.

INTERPRETABLE NEURAL NETWORK CLASSIFICATION AND MICROSTRUCTURAL ANALYSIS OF METALWORKING SLAGS AND COPPER ALLOYS OF THE LATE BRONZE AGE

Nikolaev Vladimir Dmitrievich

Postgraduate Student, Department of History, Archaeology and Ethnography
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Kravtsova Elizaveta Igorevna

Master's Student, Department of National History and Archaeology
Tyumen State University
Tyumen, Russian Federation

Abstract

The presented research paper outlines an interdisciplinary approach to reconstructing ancient metallurgical production and metalworking centers of the Late Bronze Age within the Ural-Western Siberian region. Cast bronze implements, ornaments, and manufacturing waste (slags, prills, slagged tuyeres) serve as key sources of information regarding the level of ancient technological development, ore raw material sources, and trade routes. The authors have developed a hybrid classification model based on a feedforward neural network and gradient boosting, enabling the differentiation of ore sources and alloy formulations using trace element compositions and phase inclusions. To overcome the black box problem, an algorithm for calculating Shapley values was integrated into the model, quantitatively evaluating the contribution of arsenic, antimony, nickel, and silver impurities to conclusions about metal provenance. The microstructural investigation of slag crusts via scanning electron microscopy confirmed the correctness of the neural network estimates regarding ancient smelting temperature regimes.

Keywords: ancient history, archaeology, Bronze Age, ancient metallurgy, electron probe microanalysis, metallography, Shapley values, machine learning, alloy formulation.

Введение

Развитие металлургии меди и ее сплавов в эпоху поздней бронзы стало мощнейшим фактором социальной дифференциации и интенсификации межкультурного обмена в Евразии. Формирование Андроновской (Фёдоровской) и Алакульской культурных общностей, а также Евразийской металлургической провинции сопровождалось освоением меднорудных месторождений Зауралья и Казахстанского мелкосопочника.

Изучение древнего металлопроизводства основывается на анализе химического состава артефактов и шлаков. Добавки мышьяка, олова, свинца или оловянно-мышьяковые лигатуры кардинально меняли литейные и механические свойства меди: понижали температуру плавления, улучшали жидкотекучесть и повышали твердость изделий после холодной проковки. Однако состав готового бронзового предмета отражает не только исходную руду, но и многократную переплавку лома, смешивание металла из разных источников и технологические потери летучих элементов.

Традиционные гистограммы и двумерные геохимические графики не способны учесть сложные многомерные зависимости между микропримесями (Arsenic, Antimony, Nickel, Silver, Bismuth) в условиях вариабельности древних процессов. Использование интерпретируемого алгоритма машинного обучения позволяет надежно группировать металлические артефакты по металлургическим группам, выявлять уникальные геохимические подписи конкретных рудников и реконструировать технологические рецепты древних литейщиков.

Методология исследований и структура признакового пространства

Для проведения исследований были отобраны образцы медных и бронзовых предметов, а также металлургических шлаков из поселенческих и погребальных комплексов степного и лесостепного Зауралья. Анализ элементного состава выполнялся методом оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и методом микрорентгеноспектрального анализа на сканирующем электронном микроскопе.

Сформированный вектор диагностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр концентраций основных легирующих элементов (олово, мышьяк, свинец, цинк) характеризует преднамеренную рецептуру составления сплава под конкретный тип изделия.

Параметр микропримесей примесных элементов (никель, сурьма, серебро, висмут, кобальт) отражает рудную геохимическую привязку исходного сырья.

Параметр фазового состава шлаков и концентрации остаточного железа характеризует восстановительный потенциал газовой среды и температуру в древнем плавильном горне.

Параметр размера зерна и характера интерметаллических включений отражает условия охлаждения отливки и последующую механико-термическую обработку (отжиг, проковка).

На основе диагностического массива обучена гибридная модель, а модуль Shapley-значений визуализирует степень влияния каждого элемента на принятие окончательного решения.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим направлениям.

Направление рудной индикации связывает примесный профиль с конкретными типами рудных месторождений (окисленные, сульфидные или медистые песчаники).

Направление рецептурного конструирования выделяет искусственные литейные сплавы от чистой "нелегированной" меди.

Направление реконструкции термодинамики плавки оценивает температуру и интенсивность дутья по химизму шлаковых фаз.

Анализ полученных результатов

Обработка геохимических данных трехсот восьмидесяти артефактов позволила классифицировать металлообрабатывающие центры региона с точностью до девяноста трех с половиной процентов.

Анализ Shapley-значений показал, что главным разделяющим фактором между местным производством и импортными поступлениями является устойчивое соотношение никеля и серебра, которое практически не изменяется при окислительной переплавке металла.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказан широкий импорт оловянных бронз из Алтайско-Саянского горно-металлургического центра наряду с использованием местных мышьяковых руд Зауралья.

Во-вторых, на основе анализа микроструктуры шлаков установлено, что древние мастера устойчиво поддерживали температуру в плавильных горнах на уровне от одной тысячи ста пятидесяти до одной тысячи двухсот пятидесяти градусов Цельсия с использованием искусственного дутья.

В-третьих, сформирована базовая база геохимических подписей для археологических лабораторий, позволяющая оперативно атрибутировать новые клады и погребальный инвентарь эпохи бронзы.

Заключение

Гибридная математическая модель с модулем Shapley-интерпретации показала высокую эффективность при решении задач археологического материаловедения. Полученные результаты дают возможность детально воссоздавать производственные цепочки древности — от добычи руды до конечной обработки готового оружия или украшения.

В дальнейшем авторский коллектив планирует распространить данную методологию на анализ железообрабатывающих производств раннего железного века.

Литература

1. Черных Е. Н. Древнейшая металлообработка Восточной Европы. — М.: Наука, 1966. — 240 с.
2. Кузьминых С. В. Металлургия Евразии в эпоху бронзы. — М.: Наука, 1983. — 258 с.
3. Рындина Н. В. Древнейшее металлообрабатывающее производство Восточной Европы. — М.: Издательство МГУ, 1998. — 288 с.
4. Дегтярева А. Д. История металлопроизводства Южного Зауралья в эпоху бронзы. — Новосибирск: Наука, 2010. — 320 с.
5. Tylecote R. F. A History of Metallurgy. — London: Maney Publishing, 2002. — 256 p.
6. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 30). — 2017. — P. 4765–4774.