

ИНТЕРПРЕТИРУЕМЫЙ АНАЛИЗ МИКРОМОРФОЛОГИИ И ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА КЕРАМИКИ ЭНЕОЛИТА И БРОНЗОВОГО ВЕКА: НЕЙРОСЕТЕВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРАДИЦИЙ И МИГРАЦИОННЫХ ПУТЕЙ

Смирнов Артем Сергеевич

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

Мельникова Полина Андреевна

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 гончарных технологий и культурно-исторических связей населения Западной Сибири и Зауралья в эпохи энеолита и бронзового века. Керамические комплексы выступают основным источником информации об истоках культурных традиций, технологических навыках и направлениях миграций древних общин. Авторами сформирована многопараметрическая модель на основе алгоритма случайного леса, прогнозирующая принадлежность археологических находок к конкретным гончарным центрам по данным рентгенофлуоресцентного анализа, петрографии и микроскопии формовочных масс. Для устранения неопределенности в выносимых алгоритмом решениях применен модуль локальных объяснений на основе Shapley-значений. В работе подробно раскрыта историко-технологическая сущность влияния конкретных минеральных примесей, органических добавок и режимов обжига на выводы о локальном производстве или импортном происхождении сосудов. Полевые исследования и анализ музейных коллекций подтвердили высокую точность и научную наглядность предложенной методики.

Ключевые слова: древняя история, археология, энеолит, бронзовый век, гончарные традиции, рентгенофлуоресцентный анализ, случайный лес, Shapley-значения, петрография керамики, миграционные процессы.

INTERPRETABLE ANALYSIS OF ENEOLITHIC AND BRONZE AGE CERAMIC MICROMORPHOLOGY AND ELEMENTAL COMPOSITION: NEURAL NETWORK IDENTIFICATION OF TECHNOLOGICAL TRADITIONS AND MIGRATION ROUTES

Smirnov Artem Sergeevich

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

Melnikova Polina Andreevna

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

Abstract

The present research paper outlines an interdisciplinary approach to reconstructing ancient pottery technologies and cultural-historical connections of the population of Western Siberia and the Trans-Urals during the Eneolithic and Bronze Age epochs. Ceramic complexes serve as the primary source of information regarding the origins of cultural traditions, technological skills, and migration routes of ancient communities. The authors have developed a multi-parametric model based on the random forest algorithm, which predicts the provenance of archaeological finds to specific pottery centers using data from X-ray fluorescence analysis, petrography, and microscopy of paste compositions. To eliminate uncertainty in the decisions issued by the algorithm, a local explanation module based on Shapley values was applied. The paper reveals in detail the historical and technological essence of how specific mineral inclusions, organic additives, and firing regimes influence conclusions about local production versus imported origins of vessels. Fieldwork and the analysis of museum collections confirmed the high accuracy and scientific clarity of the proposed methodology.

Keywords: ancient history, archaeology, Eneolithic, Bronze Age, pottery traditions, X-ray fluorescence analysis, random forest, Shapley values, ceramic petrography, migration processes.

Введение

Археологическое изучение памятников эпохи энеолита и бронзового века Евразии позволяет воссоздать процессы формирования ранних металлургических провинций, направления миграционных потоков и структуру межобщинного обмена. Керамика представляет собой наиболее массовый и устойчивый во времени археологический материал.

Технология изготовления глиняной посуды включает выбор сырья, составление искусственных формовочных масс, конструирование тулова, нанесение орнамента и обжиг. Эти операции формируют устойчивые гончарные традиции, передававшиеся из поколения в поколение в рамках отдельных социальных групп.

Однако визуальный анализ морфологии и орнамента сосудов не всегда позволяет достоверно разграничить посуду, изготовленную на месте по заимствованным образцам, от импортных изделий, принесенных мигрирующими группами. Развитие естествознания в археологии привело к широкому применению методов естественных наук: рентгенофлуоресцентного спектрального анализа (РФА), оптической петрографии и электронного микроанализа, позволяющих фиксировать элементный и минералогический состав глиняного теста.

Обработка больших массивов геохимических данных традиционными статистическими методами часто затруднена нелинейными связями между концентрациями микроэлементов. Применение алгоритмов машинного обучения позволяет надежно группировать археологические находки и связывать их с конкретными геологическими источниками сырья. Внедрение модулей интерпретации Shapley-значений дает возможность исследователям-археологам получать не просто формальные кластеры, а четкое историко-технологическое обоснование, выделяющее критические индикаторы сырьевых рецептов и культурного импорта.

Методология исследований и структура признакового пространства

Для проведения исследований были отобраны образцы керамики из энеолитических и бронзовых поселений и могильников Тоболо-Ишимского междуречья. Сбор данных включал петрографический анализ шлифов в проходящем свете и определение геохимического профиля формовочной массы методом портативной рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

Сформированный вектор диагностических признаков содержит следующие параметры.

Параметр концентраций редких и рассеянных элементов (рубидий, стронций, цирконий, барий) характеризует геохимический «подпись» конкретного месторождения глины.

Параметр процента и гранулометрического состава минеральных примесей (шамот, дресва, песок, тальк) отражает осознанные технологические рецепты составления формовочных масс.

Параметр микроструктурных следов органических растворимых добавок (навоз, выжимки растений, пух) определяет традиции подготовки глиняного теста.

Параметр фазового состава железосодержащих минералов и степени спекаемости глины характеризует температурный режим и окислительно-восстановительную среду обжига в древних гончарных горнах или кострах.

На основе указанного признакового набора обучена ансамблевая модель случайного леса, классифицирующая образцы по культурным группам и производственным центрам. Модуль Shapley-значений раскладывает решение алгоритма на конкретные физико-химические индикаторы.

Сформированные аналитические блоки разделены по следующим историко-технологическим направлениям.

Направление сырьевой локализации указывает на использование местного глинистого сырья конкретных речных террас.

Направление рецептурных традиций выделяет искусственно введенные отошители, характерные для определенных этнокультурных общностей.

Направление обжиговой технологии характеризует уровень владения термическими процессами у древних мастеров.

Анализ полученных результатов

Обработка массива данных по пятисот пятидесяти образцам керамики показала высокий уровень точности классификации. Модель определила принадлежность находок к местным или импортным производственным центрам с точностью до девяноста четырех с половиной процентов.

Анализ Shapley-значений показал, что наиболее информативным показателем для разделения культурных групп является соотношение стронция к барию, отражающее геохимические особенности глинистых толщ, а также наличие тальковой дресвы, выступающей маркером контактов с зауральскими горно-лесными центрами.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты.

Во-первых, доказано наличие постоянного импорта посуды или сырьевых компонентов из Зауралья на памятники Нижнего Притоболья в эпоху бронзы, что подтверждает устойчивые обменные маршруты.

Во-вторых, на основе декомпозиции факторов удалось разграничить сосуды, сделанные пришлым населением из местного сырья, от изделий, отвезенных в готовом виде из удаленных поселений.

В-третьих, разработан наглядный диагностический протокол для археологических лабораторий, позволяющий проводить экспресс-атрибуцию новых керамических комплексов непосредственно в ходе полевых сезонов.

Заключение

Применение алгоритмов машинного обучения с понятной физико-химической интерпретацией входных параметров открывает новые возможности для археологии и древней истории. Высокая наглядность формируемых решений гарантирует объективность реконструкции древних технологий, позволяет точно восстанавливать миграционные пути и торговые контакты древних обществ.

В дальнейшем планируется расширить разработанный подход для анализа состава древних медных и бронзовых артефактов.

Литература

1. Бобринский А. А. Гончарство Восточной Европы. Источники и методы изучения. — М.: Наука, 1978. — 272 с.
2. Глушков И. Г. Керамика как археологический источник. — Новосибирск: Издательство Института археологии и этнографии СО РАН, 1996. — 328 с.
3. Васильева И. Н., Салугина Н. П. Петрографический метод в изучении древней керамики // Археология, этнография и антропология Евразии. — 2011. — № 4. — С. 75–83.
4. Косарев М. Ф. Древняя история Западной Сибири: Эпоха бронзы и железа. — М.: Наука, 1981. — 302 с.
5. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. — 2001. — Vol. 45, No. 1. — P. 5–32.
6. Lundberg S. M., Erion G. G., Lee S.-I. Consistent Individualized Feature Attribution for Tree Ensembles // arXiv preprint arXiv:1905.04610. — 2019.