УДК 902, 903.01, 903.01/.09 https://doi.org/10.24852/2587-6112.2026.5.167.178

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ КРЕМНИСТЫХ ПОРОД: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ[1]

©2026 г. В.Н. Карманов, А.С. Макаров

Публикуются основные результаты исследований тепловой обработки кремнистых пород в древности. Определены главные направления в изучении этого явления, среди которых: распознавание и доказательство намеренного нагрева, его преимущества для расщепления камня, изменения в породе в результате теплового воздействия и технология термической обработки. Установлено, что к настоящему времени в рассматриваемой области исследований удалось определить выраженные визуально признаки термического воздействия на артефакты; разработать комплекс методов и предложить для апробации новые подходы для их выявления и доказательства. Были выявлены преимущества тепловой обработки как приема подготовки сырья для расщепления и собраны свидетельства возможных эстетических и символических свойств предметов, изготовленных с её помощью. Были предложены модели физико-химических трансформаций в породе в результате теплового воздействия. Экспериментально определены общие оптимальные режимы намеренного нагрева, а также конкретные программы для региональных разновидностей сырья. Изучена тепловая обработка у народа консо, до сих пор использующих ее для изготовления орудий из халцедона. Актуальные задачи дальнейших исследований – это выявление и доказательство применения тепловой обработки в конкретных археологических материалах; эксперименты для определения оптимальных режимов нагрева региональных разновидностей кремнистых пород; описание технологических контекстов и места в последовательности расщепления; география и хронология явления, определение механизмов его распространения в региональном и глобальном масштабах.

Ключевые слова: археология, каменная индустрия, пиротехнология, улучшение свойств природных материалов, естественно-научные методы

EXPERIMENTAL AND INSTRUMENTAL STUDIES OF HEAT TREATMENT OF SILICIOUS ROCKS: CURRENT STATE[2]

V.N. Karmanov, A.S. Makarov

This paper outlines the primary outcomes of research into the heat treatment of siliceous rocks in ancient times. The main directions in the study of this phenomenon have been identified, including the recognition and proof of intentional heating, its advantages for lithic knapping, changes in the rock structure caused by heating and the heat treatment technology itself. It has been established that, to date, this field of research has succeeded in identifying visually evident traces of heat treatment on artefacts, a comprehensive set of methods has been developed and new approaches for their identification and proof have been proposed for testing. The advantages of intentional heating as a technique for preparing rocks for knapping have been identified and evidence of the possible aesthetic and symbolic properties of objects produced using it has been collected. Models of physicochemical transformations in the rock resulting from thermal influence have been proposed. General optimal modes of intentional heating, as well as specific programmes for regional varieties of raw materials, have been determined experimentally. Heat treatment has been studied among the Konso people, who still practice it to manufacture chalcedony tools. Current objectives for further research include identifying and proving the application of heat treatment in specific archaeological materials; conducting experiments to determine the optimal heating modes for regional varieties of siliceous rocks; describing technological contexts and its place within the reduction sequence; analyzing the geography and chronology of the phenomenon to determine the mechanisms of its regional and global expansion.

Keywords: archaeology, stone industry, pyrotechnology, improvement of the properties of natural materials, scientific methods.

[1] Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-02713, https://rscf.ru/project/25-28-02713/

[2] The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 25-28-02713, https://rscf.ru/project/25-28-02713/

Введение

Тепловое воздействие на каменные породы и артефакты в древности обусловлено случайными событиями и намеренным нагревом, контролируемым человеком. Эти два процесса обозначаются как термические изменения (далее – ТИ) и тепловая обработка (далее – ТО) (напр.: Brown et al., 2009). В 1964 г. Д. Кребтри доказал, что намеренный нагрев кремнистых пород является эффективным способом улучшения механических свойств сырья для расщепления (Crabtree, Butler, 1964). Позже были определены возможные эстетические и символические функции намеренного нагрева (Holyoke et al., 2020). И система высокотемпературного воздействия на необработанное сырье и предметы может быть представлена сегодня в виде схемы на рис. 1, на котором также представлены примеры разных видов и целей термического воздействия из археологических контекстов долины р. Вычегды, Республика Коми (рис. 1: Б).

В течение последующих чуть более 60 лет археологи активно изучали это явление. К настоящему моменту наша библиография включает более 200 публикаций, большая часть которых составляет основной пул наиболее цитируемых работ и доступна для полного изучения. Не учтены тезисы и самиздат флинтнепперов.

В настоящее время наиболее интенсивно проводит исследования П. Шмидт (университет г. Тюбингена, Германия) и можно сказать, что сегодня его коллектив лидирует в изучении ТО (напр.: Schmidt, 2014; 2020; Schmidt et al., 2012; 2016). С конца 2010-х гг. проблематику намеренного нагрева кремнистых пород стал активно разрабатывать Дж. Бачеллери

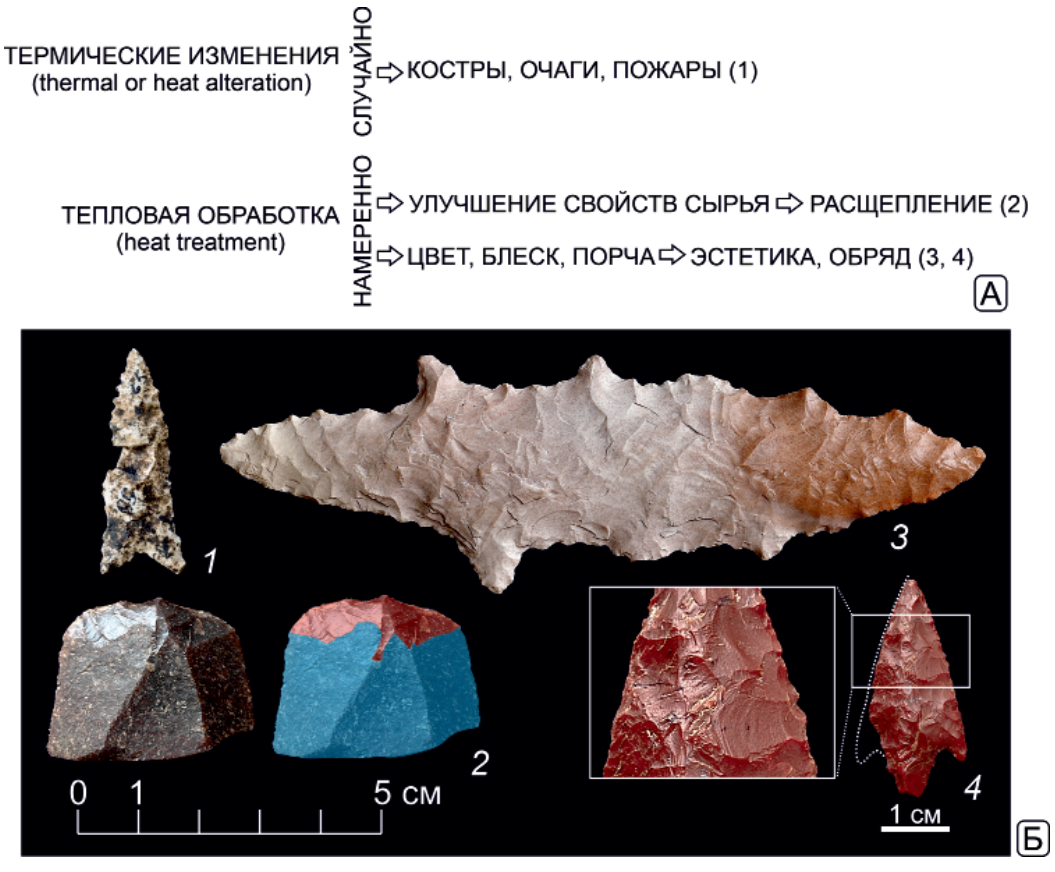


Рис. 1. Тепловое воздействие на породу и артефакты (А) и археологические примеры (Б): 1 – Даньдор, термически измененный наконечник стрелы; 2 – Эньты IV, скребок, изготовленный из предмета, подвергнутого ТО; 3 – Угдым IБ, фигурный бифас из термически обработанной породы, возможно, учтена неоднородная структура породы; 4 – Ульяновское погребение, намеренно нагретый и переоформленный наконечник стрелы
Fig. 1. Thermal impact on rock and artefacts (A) and archaeological examples (Б): 1 – Dandor, a heat altered arrowhead; 2 – Enty IV, a scraper made of heat treated object; 3 – Ugdym IБ, biface made of heat treated rock, the heterogeneous structure of the rock may have been taken into account; 4 – Ulyanovskoe burial, intentionally heated and reshaped arrowhead

также при участии П. Шмидта (Bachellerie et al. 2019; Bachellerie, Schmidt, 2020; 2022) и М. Моник (университет Палацкого, Чехия) (Monik et al., 2021 a, b; Sahle et al., 2025). К этому же периоду относятся первые публикации нашего коллектива (Карманов, 2018; 2019).

Последняя обобщающая работа, касающаяся всех аспектов ТО и ТИ, была опубликована в 2007 г. (Domanski, Webb, 2007). К 2020 г. относится одна энциклопедическая статья (Schmidt, 2020), а к 2021 г. – обобщение данных о намеренном нагреве в палеолите (Monik et al., 2021b).

Основные сюжеты в изучении ТО представляют: 1) ее распознавание и доказательная интерпретация; 2) преимущества намеренного нагретого сырья; 3) изменения породы после ТО; 4) технология ТО; 5) технологический контекст ТО, включая отбор сырья для нее; 6) место ТО в последовательности расщепления; 7) хронология и география явления.

Цель нашей работы – характеристика современного состояния экспериментальных и инструментальных исследований ТО кремнистых пород в мировой археологии и определение их перспектив. Основным условием для проведения современного инструментального изучения является получение экспериментально нагретых образцов и их сравнение с естественным состоянием геологических образцов. Поэтому в настоящее время эти два вида исследований неотделимы друг от друга. В этой работе мы рассмотрим первые четыре сюжета, обозначенные выше, поскольку преимущественно исследовательские ресурсы расходуются именно на них.

1. Распознавание и доказательная интерпретация ТО

Критерии распознавания ТО и ТИ разных пород, а также данные об инструментальных методах, применяемых для этого, обобщили и распределили по степени надежности М. Домански и Дж. Вебб (Domanski, Webb, 2007, table 1–3). На рис. 2 для наглядности мы представили обобщенную схему с учетом современных данных (рис. 2).

Экспериментами доказано, что поверхности, созданные после нагрева, светлее, глаже и более блестящие, и в зависимости от вида сырья предмет приобретает охристый цвет, а его окраска становится более контрастной. Если таких изделий в коллекции единицы, то мы не можем исключить ситуацию, когда артефакты случайно попадали, например, в очаг, оптимально «запекались», а потом их могли подобрать и обработать. Но если изделий с описанными признаками много (напр.: Карманов, 2018; 2019), они образуют последовательности продуктов расщепления - от чешуек до орудий, - то на сегодня нет ни одного варианта адекватной интерпретации, почему так произошло, кроме как вероятности их ТО.

Цель инструментальных исследований – выявление преобразований, происходящих во время и после теплового воздействия. Поэтому они основаны на сравнительном анализе фоновых геологических образцов, аналогичных породам, из которых изготовлены артефакты. Для этого применяются различные методы спектроскопии (Фурье, рамановская, электронно-спиновой резонанс и др.), среди которых спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона сегодня является наиболее часто используемым методом для изучения термически обработанных артефактов (Schmidt et al., 2013; 2017; Weiner et al., 2015; Santaniello et al., 2016; Milot et al., 2017; Goder-Goldberger et al., 2019; Bachellerie et al., 2019; Bachellerie, Schmidt, 2020; Gurova et al., 2020; Agam, 2021; Bachellerie, Schmidt, 2022). Структурные изменения кремнистых пород приводят к постепенному сокращению межзеренных пор, что позволяет распознавать нагретые артефакты, а также температуры, воздействию которых подвергся предмет (Schmidt, Morala, 2018; Schmidt et al., 2017).

В 1970-х – 2000-х гг. для доказательства применения ТО и прямого датирования нагретых и обожженных каменных артефактов использовался метод термолюминесценции (TL) (напр.: Richter, 2007). Однако для определения возраста голоценовых материалов этот метод груб, а как способ обоснования намеренного нагрева он в последнее время почему-то не применяется.

Сравнительно редким методом является изучение жидких включений в породе (fluid inclusions) с микротермическими измерениями (Milot et al., 2017, p. 419–421). Этот метод позволяет определить, контактировала ли захваченная жидкость с минералом во время его роста (первичные включения) или она была захвачена в нем после его образования

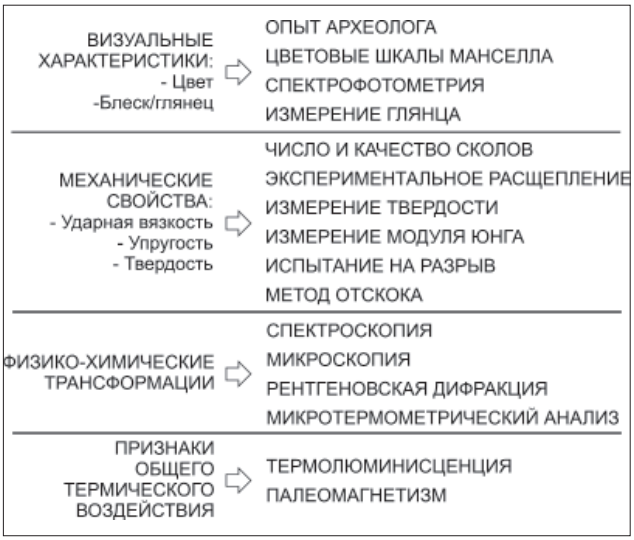


Рис. 2. Признаки теплового воздействия и основные методы его распознавания
Fig. 2. Features of heat treatment and the main methods for its recognition

(вторичные включения), что может указывать на намеренные манипуляции с породой.

Обсуждается целесообразность применения рентгеновской дифракции, которая фиксирует рекристаллизацию кристаллов кварца во время нагрева (Gurova et al., 2020; Domanski et al., 2009), но не эффективна при изучении образцов, которые нагреты всего лишь до 250–300°C (Monik et al., 2021b, p. 5).

Пробоподготовка для этих методов предполагает частичное разрушение артефактов. Было предложено использовать рентгеновскую компьютерную томографию высокого разрешения (high-resolution X-ray micro-CT), не оказывающего такого негативного влияния на предметы. Она позволяет более детально изучать и визуализировать трансформации, происходящие в предмете после ТО (Fiers et al., 2021, p. 10–14). Также заявлено, что измерение плотности оказывается «экономически эффективным и быстрым неразрушающим методом, особенно подходящим для предварительной оценки термической обработки крупных каменных скоплений» (Santaniello et al., 2021, p. 1). Он подразумевает построение эталонной кривой зависимости плотности от температуры ТО для образцов геологического кремня того же происхождения, что и исследуемые археологические артефакты.

Среди неразрушающих артефакты методов популярны визуализация и анализ поверхностей сканирующим электронном микроскопом. Результаты его применения присутствуют практически во всех современных исследованиях (напр.: Santaniello et al., 2021; Oufakir, Khouchaf, 2023).

Каппаметрия позволяет сравнить минералогический состав образцов обожженных и ненагретых камней, поскольку термическое воздействие обычно преобразует более слабые магнитные минералы в более сильные магнитные минеральные фазы при температурах ниже 600°C. Однако ее применение в современных исследованиях ограничено (Brown et al., 2009; Monik et al., 2021a), вероятно, в силу того что оно обосновывает любое тепловое воздействие на артефакт, а не только намеренный нагрев.

Особо следует выделить круг методов, нацеленных на фиксацию, сравнение цвета и блеска «сырых» и нагретых предметов, поскольку именно эти признаки в первую очередь доступны для визуальной, но субъективной оценки. Изменение окраски породы после ТО документируется инструментально с помощью цветовых шкал Манселла для горных пород и почв (напр.: Cowan, 1987; Sunseri, Delage, 2016) и спектрофотометра (Fiers et al., 2021). Предложен также способ измерения цвета с помощью цифровой фотографии и графических редакторов (Frick et al., 2012).

Для измерения глянца поверхностей, созданных после ТО, и доказательства ее применения предложено использовать лазерный сканирующий микроскоп (Bachellerie, Schmidt, 2020). Был введен параметр Ra, обозначающий среднюю разницу высот каждой точки поверхности по сравнению со средним арифметическим профиля. Сравнение образцов по Ra призвано устранить недостатки измерений степени глянца с помощью глоссметров (блескомеров) (напр.: Brown et al., 2009), показания которых зависят в том числе от свойств поглощения и преломления света, неровности рельефа, которые отличаются у разных пород и минералов. Однако сами исследователи считают, что достоверность измерений Ra требуется доказать дальнейшими исследованиями (Bachellerie, Schmidt, 2020, p. 5, 6). Еще один инструмент изучения микрорельефа и соответственно степени шероховатости и глянца поверхностей предполагает использование 3D-микроскопа в

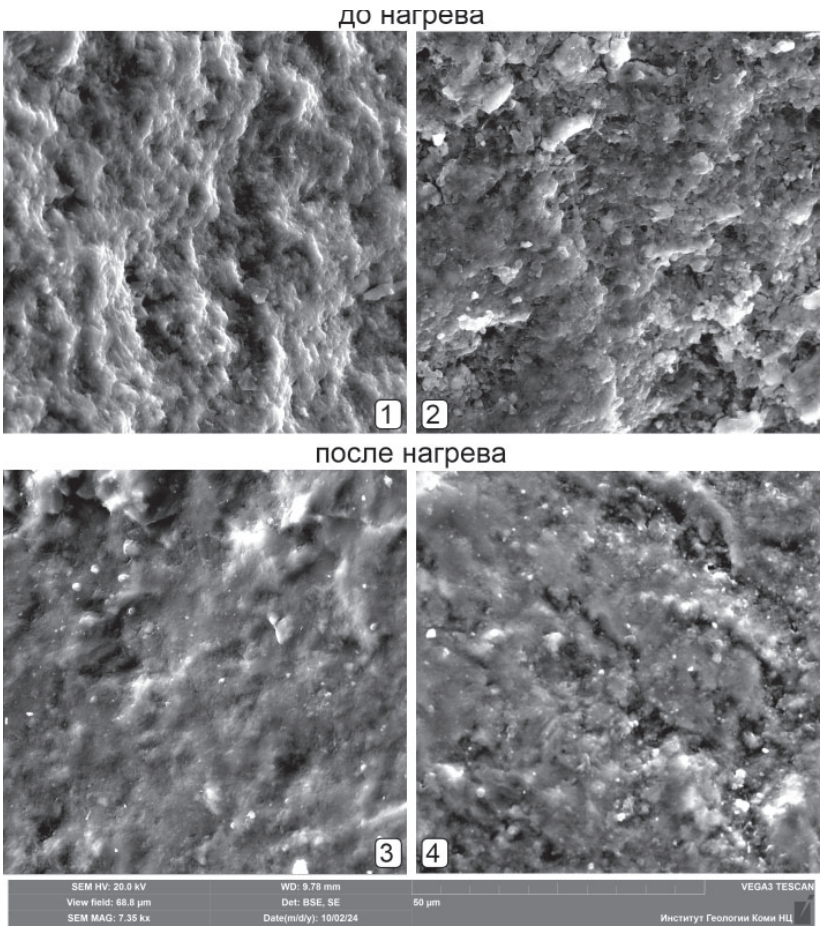


Рис. 3. Изображения поверхностей, полученных сканирующим электронным микросокопом в ЦКП «Геонаука» (Институт геологии Коми НЦ УрО РАН). 1, 3 – экспериментальные образцы (см. рис. 3); 2, 4 – археологический образец (отщеп из поселения Шиховское II)

Fig. 3. Images of surfaces obtained with a scanning electron microscope at the Center for Collective Use «Геонаука» (Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences). 1, 3 – experimental samples (see fig. 3); 2, 4 – archaeological sample (flake from the Shikhovskoye II settlement)

совокупности с ГИС-технологиями и статистическими методами (Murray et al., 2020).

Основная проблема всех инструментальных методов заключается в невозможности идентифицировать со 100% достоверностью ТО и случайно обожженный предмет в небольших выборках. Нужно сочетание методов, сравнительный анализ аналогичного необработанного сырья, его экспериментального нагрева и артефактов, наличие макроследов и повторяемость наблюдений.

2. Преимущества ТО

Определены две основные группы преимуществ: технологические и эстетические или символические. Мастера народности консо в Эфиопии отмечают лучшую колкость и предсказуемость расщепления. Материал становится более однородным и гладким, увеличивается его твердость, а кромки инструментов становятся острее. Однако результаты экспериментального использования орудий, изготовленных из нагретой породы, свидетельствуют о более быстром затуплении лезвий. Но все же преимущества перевешивают этот недостаток и консо продолжают запекать халцедон (Sahle et al., 2025). Более быстрое изнашивание лезвий инструментов, изготовленных с применением ТО, показано и предыдущими экспериментами. Исследователи предположили, что намеренный нагрев поэтому мог применяться для производства не всех типов орудий. (Olausson, 1983, p. 10, 11).

Изучение механических свойств и эксперименты указывают на лучшую «расщепляемость» и контроль в создании сколов с нуклеусов и ретушировании термообработанного сырья (Crabtree and Butler, 1964; Mandeville, Flenniken, 1974; Bleed and Meier, 1980; Rick, Chapell, 1983; Mraz et al., 2019). Из-за возможности получения большего числа снятий

возрастает «емкость» нуклеусов, а кромки сколов становятся острее (Pargeter, Schmidt, 2020). Поверхность, созданная после нагрева, имеет более гладкий рельеф (рис. 3). Здесь уместна аналогия: заточка или поправка металлического инструмента, которая как раз и направлена на нивелирование микрорельефа его лезвия. Более гладкий рельеф образующейся после ТО трещины намеренного скалывания объясняется структурными изменениями материала во время нагрева (см. раздел 3). Различие в процессе образования трещин в «сырой» и нагретой породе детально описано (Schmidt et al., 2019, p. 2503, 2504, fig. 8).

Положительное влияние ТО на улучшение механических свойств материала доказано комплексом инструментальных методов, среди которых измерение твердости (по Виккерсу), вязкости (fracture toughness) и упругости (модуль Юнга), испытания на разрыв (chevron notch beam method), на прочность при изгибе (flexural strength test) и твердость при отскоке (rebound hardness test) (Brown et al., 2009; Domanski et al., 2009; Yonekura, 2010; Schmidt et al., 2019; Monik et al., 2021b; Bachellerie, Schmidt, 2022; Nickel, Schmidt, 2022). Дополнительно исследователи для оценки контроля над расщеплением и качеством снятий сравнивали число сколов и их параметры, в частности остроту кромок сколов, до ТО и после таковой (Patterson, 1979; Bleed, Meier, 1980; Pargeter, Schmidt, 2020), изготавливали экспериментальные реплики из нагретой породы (напр.: Brown et al., 2009).

Еще одна группа преимуществ ТО – эстетическая и символическая (Holyoke et al., 2020), включая намеренную порчу предметов, например, в погребальной обрядности (рис. 1Б: 4). Доказать такое целеполагание намеренного нагрева в древности сложнее, но оно не исключено. Многие материалы после нагрева меняют свой цвет с невыразительного, например, серого, на охристый или розовый (рис. 4). А значение охры и красного цвета в первобытной культуре подтверждено многократными наблюдениями. Сырье с неоднородной структурой приобретает более контрастную окраску, аналогией чему является морение древесины для выражения ее структуры. И, наконец, сколы после ТО, как правило, создают блестящую поверхность (рис. 5). Есть сырье, которое имеет естественную глянцевую поверхность, но ТО позволяет получить ее, расщепляя крупнозернистый невзрачный кремень. Наконец, не исключено, что в период раннего металла – это реплика его визуальных свойств в камне.

3. Изменения породы после ТО

Очевидно, что древний человек не мог понять внутренние физико-химические процессы, приводящие к улучшению свойств пород во время ТО. Предыдущие исследования (Gurova, 2020) и наши первые попытки экспериментов показали, что и петрография не фиксирует изменений в наблюдаемых шлифах нагретых и «сырых» образцов кремня. Однако очевидны макроскопические трансформации – изменение цвета и блеска на вновь создаваемых поверхностях (рис. 4, 5).

Были предложены различные модели, объясняющие механизм трансформации свойств пород после нагрева. М. Мандевилль на основании данных сканирующей электронной микроскопии предположил, что при нагревании происходит спекание зерен кремнезема и полученный материал становится более однородным и обеспечивает более предсказуемое прохождение трещины скалывания (Mandeville, 1973). Дж. Фленникен и Е. Гарриссон, основываясь на экспериментах с новакулитом, зафиксировали после нагрева до 500°C уплотнение микротрещин в кристаллической структуре, что, по их мнению, напрямую влияет на легкость расщепления (Flenniken, Garrison, 1975). Д. Гриффитс с соавторами предположили модель, согласно которой во время нагрева породы внутри нее происходит миграция воды и это способствует качеству образования трещин намеренного скалывания (Griffiths et al., 1987). Модель рекристаллизации, по М. Домански и Дж. Веббу, объясняет изменения свойств при нагревании результатом того, что первоначальная плохо упорядоченная, сильно сцепленная микроструктура становится более однородной и лучше кристаллизуется (Domanski et al., 2009).

Эти модели рекристаллизации были апробированы П. Шмидтом. Им установлено, что никаких изменений в структуре зерен халцедона не происходит. Взамен была предложена модель структурной трансформации, используемая в настоящее время. Согласно ей, основным изменением в халцедоне (основа кремнистых пород) после нагрева является потеря силанола (SiOH) и создание новых связей Si-O-Si в соответствии с реакцией:

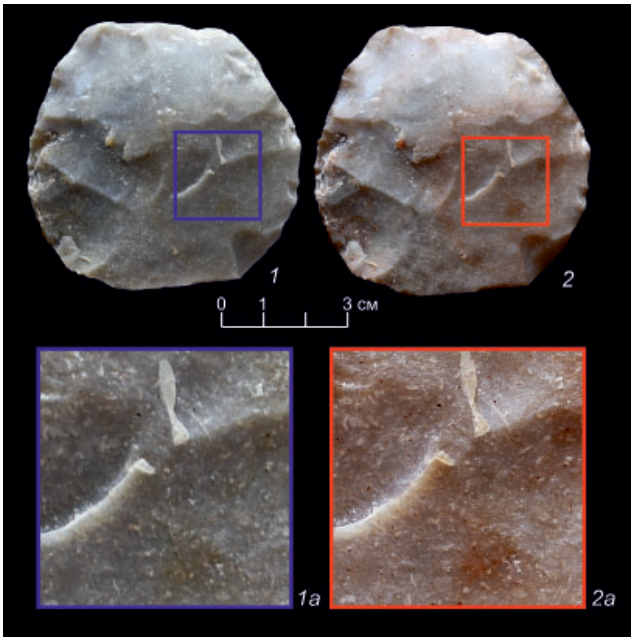


Рис. 4. Экспериментальный бифас (мастер Е.Ю. Гиря). 1 – до ТО; 2 – после ТО; 1а, 2а – детали поверхности до и после ТО

Fig. 4. Experimental biface (craftsman E.Yu. Girya). 1 – before heat treatment; 2 – after heat treatment; 1a, 2a – surface details before and after heat treatment

Si-OH HO-Si→Si-O-Si+H_2O. Эта реакция начинается между 200°C и 300°C и приводит к увеличению твердости пород. Максимальная температура нагрева и скорость темпа зависят от способности структуры эвакуировать вновь образовавшуюся воду, от размера образца и его пористости (Schmidt et al., 2012). Также определено, что неудачи при ТО и неконтролируемом раскалывании обусловлены давлением пара внутри пород, а не неоднородностью теплового расширения (Schmidt, 2014).

4. Технология ТО

Этнографические данные были получены от информантов, поэтому они примерны и в них отсутствуют точные данные о температурных режимах, хотя детально описано создание теплотехнических сооружений (Mandeville, 1973; Akerman, 1979, p. 146, 147). В этой связи значимы современные наблюдения археологов над камнеобработкой народности консо (Sahle et al., 2025). Тепловую обработку мастера проводят в помещении, яму предварительно нагревают, затем на ее дне равномерно распределяют желваки. Для утепления используется слой шерсти, после чего накрывают большим куском керамического горшка. Затем горячие угли кладутся непосредственно поверх черепка, а в качестве последнего покрытия добавляется смесь горячей золы и мелких угольков, чтобы обеспечить медленный и продолжительный процесс нагревания. Нагрев длится от 24–30 до 48 часов и его длительность зависит от размеров и сырья, и толщины корки. Измерена температура, которая на старте колебалась от 108 до 148°C, в течение часа поднялась до 223°C, а через два часа – до 387°C. После успешной термообработки яму оставляют остывать по крайней мере на час, после чего камни вынимают и кладут у очага, чтобы они продолжали медленно остывать, обычно в течение ночи (Sahle et al., 2025. P. 2. Fig. 2).

Научные полевые эксперименты по ТО, судя по публикациям, редки (напр.: Pargeter, Schmidt, 2020). В России первые успешные эксперименты с разнообразным сырьем в течение 10 лет проводил Е.Ю. Гиря (Гиря, 1997, с. 52–56), а позднее – Н.Б. Васильева, которая, однако, не делала специальных устройств для этого, а закладывала сырье в яму под костер полевой кухни (Васильева, Суворов, 2005, с. 37).

Большая часть экспериментов проводится, как правило, в программируемой муфельной печи. Определено, что в зависимости от размеров нагреваемого предмета и даже образа жизни людей (мобильность или оседлость) могли применяться две стратегии ТО – «быстрая» и «медленная» (Mercieca, Hiscock, 2008). Некоторые виды кремня требуют одного часа нагрева в диапазоне 200–300°C (Schmidt et al., 2016; Fukuda and Nakashima, 2008), а в ряде случаев успех достигался получасовым нагревом на уровне 320°C (Griffiths et al., 1987).

В целом определено, что диапазон температур для достижения оптимального эффекта нагрева варьирует от 200 до 450°C (Schmidt et al., 2012) или от 300 до 400°C (Domanski et al., 2009). Термообработка при температуре выше 500°C обычно считается критической для сохранения первоначальной литологии без разрушения (Sunseri, Delage, 2016, p. 56), а 573°C является пределом прочности кварца и микрокристаллического кремня (Cowan, 1987).

Несмотря на разные данные о температуре и времени ТО, все результаты экспериментов и сведения этнографии указывают на необходимость плавного нагрева и плавного остывания с целью избежать термического шока и разрушения предметов. Также необходимым

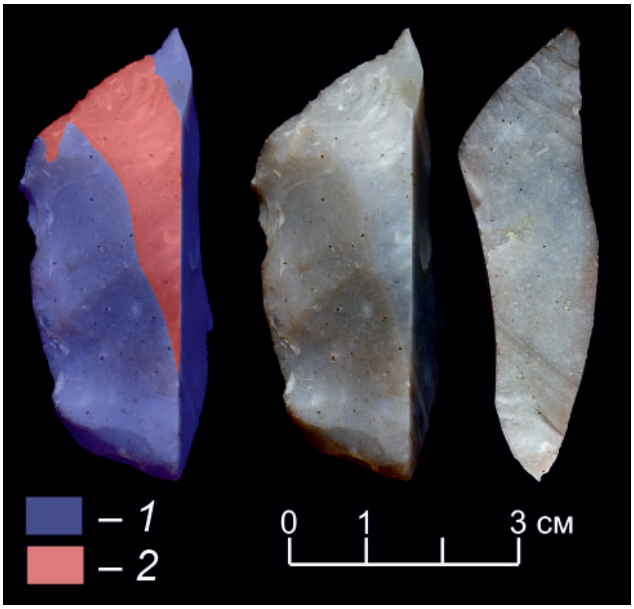


Рис. 5. Экспериментальный бифас (см. рис. 3), распиленный для получения шлифа. 1 – поверхность, созданная до ТО; 2 – негатив снятия после ТО

Fig. 5. Experimental biface (see fig. 3), cut to obtain a thin section. 1 – surface created before heat treatment; 2 – negative image of removal after heat treatment

условием является запекание в безвоздушной среде с засыпкой сырья песком или золой перед нагревом или использование песчаной ванны в муфельной печи. Определены три вида теплотехнических приспособлений для этого (Mercieca, Hiscock, 2008, fig. 3): 1) глубокая яма с углями и песчаными ванной и подушкой; 2) укладка предметов непосредственно в остывающие уголь и золу; 3) неглубокая яма под небольшим костром.

Заключение

К настоящему времени в области исследований намеренного нагрева кремнистых пород в древности удалось получить следующие результаты:

- определены выраженные визуально признаки ТО на артефактах с учетом региональных особенностей пород;
- определен комплекс методов и продолжают апробироваться новые подходы для выявления признаков использования ТО и их доказательной интерпретации, а общая тенденция характеризуется разработкой методик, неразрушающих музейные артефакты;
- определены преимущества ТО как приема подготовки сырья для расщепления;
- собраны свидетельства возможных эстетических и символических свойств предметов, изготовленных с помощью ТО или подвергнутых ТО;
- предложены модели физико-химических трансформаций в породе в результате теплового воздействия;
- экспериментально определены общие оптимальные режимы намеренного теплового воздействия, а также конкретные программы ТО для региональных разновидностей сырья;
- изучена ТО в культуре народности консо, до сих пор использующей намеренный нагрев для изготовления орудий из халцедона.

Круг задач, которые решаются сегодня и, в том числе, стоят перед нашим коллективом, включает:

- выявление и доказательство применения ТО в конкретных археологических коллекциях;
- экспериментальные исследования с учетом особенностей региональных сырьевых баз, поскольку нет единого метода термообработки, который был бы эффективен для всех разновидностей кремнистых пород и минералов;
- определение стратегий ТО в использующих ее культурах;
- описание технологических контекстов ТО и ее места в последовательности расщепления;
- географию и хронологию ТО;
- определение истоков традиций ТО в региональном и глобальном масштабах.

ЛИТЕРАТУРА

Васильева Н.Б., Суворов А.В. Применение тепловой подготовки кремня к расщеплению (по материалам энеолитического поселения Павшино 2 на реке Юг) // Археоминералогия и ранняя история минералогии: мат-лы междунар. семинара, г. Сыктывкар 30.05-4.06 2005. Сыктывкар, 2005. С. 37–39.

Гиря Е.Ю. Технологический анализ каменный индустрий. Методика микро-макроанализа древних орудий труда. СПб.: ИИМК РАН, 1997. 200 с.

Карманов В.Н. Тепловая обработка кремня в неолите Крайнего северо-востока Европы // Известия лаборатории древних технологий. 2018. Т. 14. № 3. С. 22–42. DOI: 10.21285/2415-8739-2018-3-22-42.

Карманов В.Н. Тепловая обработка кремня на Крайнем Северо-Востоке Европы в энеолите // Известия лаборатории древних технологий. 2019. № 3. С. 28–45. DOI: 10.21285/2415-8739-2019-3-28-46.

Akerman K. Heat and LT in the Kimberleys W. A. // Archaeology and Physical Anthropology of Oceania. 1979. No. 14. P. 144–159.

Bachellerie J. Schmidt P. First Results on Understanding the Shiny Surfaces of Heat-Treated Chert // LT. 2020. No. 45. P. 240–246. DOI: 10.1080/01977261.2020.1782590.

Bachellerie J., Schmidt P. Recognizing heat-treated chert: A comparison between infrared spectroscopy and fracture surface analysis // Archaeometry. 2022. No. 64. P. 39–58. DOI: 10.1111/arcm.12701.

Bachellerie J., Renard C., Schmidt P. Technical innovations during the recent Solutrean in the southwest of France: Recognition of heat treatment of chert and estimation of heating temperatures based on the example of Le Piage (Lot, France) // JAS. Report. 2019. No. 27. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.jasrep.2019.102001.

Bleed P., Meier M. An objective test of the effects of heat treatment of flakeable stone // American Antiquity. 1980. Vol. 45. No. 3. P. 502–507.

Brown K.S., Marean C.W., Herries A.I.R., Jacobs Z., Tribolo C., Braun D., Roberts D.L., Meyer M.C., Bernatchez J. Fire as an engineering tool of early modern humans // Science. 2009. No. 325. P. 859–862. DOI: 10.1126/science.1175028.

Cowan F. Heat-treating Experiments with Onondaga Chert: Preliminary Results / Ethnoarchaeology Graduate Course. Buffalo: State University of New York, 1987. 12 p.

Crabtree D.E., Butler B.R. Notes on experiment in flint knapping: 1. Heat treatment of silica minerals // Tebiwa. 1964. Vol. 7. No. 1. P. 1–6.

Domanski M., Webb J., Glaisher R., Gurba J., Libera J., Zakoscielna A. Heat treatment of Polish flints // JAS. 2009. No. 36. P. 1400–1408. DOI: 10.1016/j.jas.2009.02.002.

Domanski M., Webb J. A review of heat treatment research // LT. 2007. No. 32. P. 153–194.

Fiers G., Halbrucker E., De Kock T., Vandendriessche H., Crombé P., Cnudde V. Thermal alteration of flint: An experimental approach to investigate the effect on material properties // LT. 2021. Vol. 46. No. 1. P. 1–19. DOI: 10.1080/01977261.2020.1805215.

Flenniken J.J., Garrison E.G. Thermally altered novaculite and stone tool manufacturing techniques // Journal of field archaeology. 1975. No. 2. P. 125–131.

Frick J.A., Hoyer C.T., Herkert K., Floss H. Comparative heating experiments on flint from the Cote Chalonnaise, Burgundy, France // Anthropologie. 2012. No. 50. P. 295–321.

Fukuda J., Nakashima S. Water at high temperatures in a microcrystalline silica (chalcedony) by in-situ infrared specroscopy: Physicochemical states and dehydration behavior // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 2008. No. 103. P. 112–115.

Goder-Goldberger M., Weiner S., Barzilai O., Boaretto E. Heating of flint artifacts from the site of Boker Tachtit (Israel) was not detected using FTIR peak broadening // JAS. Report. 2017. No. 12. P. 173–182. http://dx.doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.01.041.

Griffiths D.R., Bergman C.A., Clayton C.J., Ohnuma K., Robins G.V. Experimental investigation of the heat treatment of flint // The Human Uses of Flint and Chert. Proceedings of the Fourth International Flint Symposium Held at Brighton Polytechnic. 10–15 April 1983, Cambridge: Cambridge University Press, 1987. P. 43–52.

Gurova M., Andreeva P., Nikolov A., Barbov B., Kostadinova-Avramova M. Heat alterations of flint artefacts: archaeological evidence, experiments and analyses // Bulgarian e-Journal of Archaeology. 2020. Vol. 10.1. P. 111–141.

Holyoke K.R., Blair S.E., Shaw C.S. Aesthetics or function in heat-treating? The influence of colour preference in lithic preparation on the Maritime Peninsula, Eastern Canada // Journal of Anthropological Archaeology. 2020. No. 60. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.jaa.2020.101229.

Mandeville M.D. A consideration of the thermal pretreatment of chert // Plains Anthropologist. 1973. No. 18. P. 177–202.

Mandeville M.D., Flenniken J.J. A comparison of the flaking qualities of Nehawka chert before and after thermal pretreatment // Plains Anthropologist. 1974. No. 19. P. 146–148.

Mercieca A., Hiscock P. Experimental insights into alternative strategies of lithic heat treatment // Journal of Archaeological Science. 2008. No. 35. P. 2634–2639.

Milot J., Siebenaller L., Beziat D., Lea V., Schmidt P., Binder D. Formation of fluid inclusions during heat treatment of Barremo-Bedoulian flint: Archaeometric implications // Archaeometry. 2017. No. 59. P. 417–434. DOI: 10.1111/arcm.12256.

Moník M., Hadraba H., Milde D., Chlup Z., Nerudová Z., Schnabl P. Heat treatment and mechanics of Moravian Jurassic cherts // Archaeological and Anthropological Sciences. 2021a. No. 13. P. 1–14. DOI: 10.1007/s12520-021-01388-z.

Moník M., Nerudová Z., Schnabl P. Investigation of heat-treated artefacts from Pleistocene sites // JAS. Report. 2021b. No. 37. P. 1–18. DOI: 10.1016/j.jasrep.2021.102920.

Mraz V., Fisch M., Eren M.I., Lovejoy C.O., Buchanan B. Thermal engineering of stone increased prehistoric toolmaking skill // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. P. 1–8. DOI: 10.1038/s41598-019-51139-3.

Murray J.K., Harris J.A., Oestmo S., Martin M., Marean C.W. A new approach to identify heat treated silcrete near Pinnacle Point, South Africa using 3D microscopy and Bayesian modeling // JAS. Report. 2020. No. 34. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.jasrep.2020.102622.

Nickel K.G., Schmidt P. Knapping force as a function of stone heat treatment // PLoS ONE. 2022. No. 17. DOI: 10.1371/journal.pone.0278643.

Olausson D.S. Experiments to investigate the effects of heat treatment on use-wear on flint tools // Proceedings of the Prehistoric Society. 1983. No. 49. P. 1–13.

Oufakir A., Khouchaf L. Structural and Surface Changes of SiO2 Flint Aggregates under Thermal Treatment for Potential Valorization // Crystals. 2023. No. 13. P. 1–13. https:// doi.org/10.3390/cryst13040647.

Pargeter J., Schmidt P. 'Simple' surface-fire heat treatment significantly improves silcrete flake quality and flaking efficiency // JAS: Reports. 2020. № 30. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102203.

Patterson L.W. Quantitative characteristics of debitage from heat treated chert // Plains Anthropologist. 1979. No. 24. P. 255–260.

Richter D. Advantages and limitations of thermoluminiscence dating of heated flint from Paleolithic sites // Geoarchaeology: An International Journal. 2007. Vol. 22. No. 6. P. 671–683. DOI: 10.1002/gea.20180.

Rick J., Chappell S. Thermal alteration of silica materials in technological and functional perspectives // LT. 1983. Vol. 12. No. 3. P. 69–80.

Sahle Y., Moník M., Ahmed S., Hadraba H., Chlup Z., Šiška F., Kučera L., Souron A., Brandt S.A., Arthur K.W. Ethnographic toolstone heat treatment reveals distinctive motives and patterns of material transformation // Scientific Reports. 2025. No. 15. DOI: 10.1038/s41598-025-97207-9.

Santianello F., Berloffa A., Grimaldi S., Maffei S., Pedrotti A., Gialanella S. Density measurements as a non-destructive approach to investigate the HT of siliceous lithic artefacts // Journal of Cultural Heritage. 2021. Vol. 47. P. 117–122. DOI: 10.1016/j.culher.2020.10.004.

Santaniello F., Grimaldi S., Pedrotti A., Gialanella S. First evidence of heat treatment during the early Neolithic in northeastern Italy // Quaternary International. 2016. Vol. 402. P. 80–89. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.08.006.

Schmidt P. Heat Treatment // Oxford research encyclopedia of anthropology. Oxford University Press, 2020. DOI: 10.1093/acrefore/9780190854584.013.45.

Schmidt P. What causes failure (overheating) during lithic heat treatment? // AAS. 2014, No. 6. P. 107–112. doi:10.1007/s12520-013-0162-3.

Schmidt P., Buck G., Berthold C., Lauer C., Nickel K.G. The mechanical properties of heat-treated rocks: a comparison between chert and silcrete // AAS. 2019. No. 11. P. 2489–2506. DOI: 10.1007/s12520-018-0710-y.

Schmidt P., Masse S., Laurent G., Slodczyk A., Le Bourhis E., Perrenoud C., Livage, J., Fröhlich F. Crystallographic and structural transformations of sedimentary chalcedony in flint upon heat treatment // JAS. 2012. No. 39. P. 135–144. DOI: 10.1016/j.jas.2011.09.012.

Schmidt P., Morala A. First insights into the technique used for heat treatment of chert at the Solutrean site of Laugerie-haute, France // Archaeometry. 2018. Vol. 60. P. 885–897. DOI: 10.1111/arcm.12358.

Schmidt P., Paris C., Bellot-Gurlet L. The investment in time needed for heat treatment of flint and chert // AAS. 2016. No. 8. P. 839–848. DOI: 10.1007/s12520-015-0259-y.

Schmidt P., Spinelli Sanchez O., Kind C.-J. Stone heat treatment in the Early Mesolithic of Southwestern Germany: interpretation and identification // PLoS ONE. 2017. No. 12. DOI: 10.1371/journal.pone.0188576.

Sunseri J.U., Delage C.D. The color of transformation: investigations into heat treatement of Natufia artifacts from Hayonim terrace (Israel) // Mediterranean Archaeology and Archaeometry. 2016. Vol. 16. No. 3. P. 51–64. DOI: 10.5281/zenodo.160949.

Weiner S., Brumfeld V., Marder O., Barzilai O. Heating of flint debitage from Upper Palaeolithic contexts at Manot Cave, Israel: Changes in atomic organization due to heating using infrared spectroscopy // JAS. 2015. Vol. 54. P. 45–53. http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2014.11.023.

Yonekura K. Experimental study on heat alteration of Palaeolithic material: preliminary results from Shale in the Northeastern region of Japan // Asian Perspectives. 2010. Vol. 49. No. 2. P. 348–362. DOI: 10.1353/asi.2010.0011.

Информация об авторах:

Карманов Виктор Николаевич, кандидат исторических наук, заведующий сектором, ведущий научный сотрудник. Институт языка, литературы и истории ФИЦ Коми научного центра Уральского отделения РАН (г. Сыктывкар, Россия); vkarman@bk.ru

Макаров Александр Сергеевич, старший лаборант-исследователь. Институт языка, литературы и истории ФИЦ Коми научного центра Уральского отделения РАН (г. Сыктывкар, Россия) makarov_as@bk.ru

REFERENCES

Vasilieva, N. B., Suvorova, A. V. 2005. *Arkheomineralogiia i ranniaia istoriia mineralogii: materialy Mezhdunarodnogo seminara (Syktyvkar, 30 maia – 4 iiunia 2005 g.) (Archaeomineralogy and the Early History of Mineralogy: Proceedings of the International Seminar (Syktyvkar, May 30th – June 4th, 2005))*. Syktyvkar: "Geoprint" Publ., 37–39 (in Russian).

Girya, E. Yu. 1997. *Tekhnologicheskiy analiz kamennyy industriy. Metodika mikro-makroanaliza drevnikh orudiy truda (Technological analysis of the stone industry. The technique of micro-macroanalysis of ancient tools)*. Saint Peterburg: Institute for the History of Material Culture, Russian Academy of Sciences (in Russian).

Karmanov, V. N. 2018. In *Izvestiya Laboratorii drevnikh tekhnologiy: (Journal of Ancient Technology Laboratory)* 14 (3), 22–42 (in Russian).

Karmanov, V. N. 2019. In *Izvestiya Laboratorii drevnikh tekhnologiy: (Journal of Ancient Technology Laboratory)* (3), 28–45 (in Russian).

Akerman, K. 1979. In *Archaeology and Physical Anthropology of Oceania*. (14), 144–159.

Bachellerie, J., Schmidt, P. 2020. In *Lithic Technology* (45), 240–246. DOI: 10.1080/01977261.2020.1782590.

Bachellerie, J., Schmidt, P. 2022. In *Archaeometry* (64), 39–58. DOI: 10.1111/arcm.12701.

Bachellerie, J., Renard, C., Schmidt P. 2019. In *Journal of Archaeological Sciences. Report* (27), 1–12. DOI: 10.1016/j.jasrep.2019.102001.

Bleed, P., Meier, M. 1980. In *American Antiquity* vol. 45, No. 3, 502–507.

Brown, K. S., Marean, C. W., Herries, A. I. R., Jacobs, Z., Tribolo, C., Braun, D., Roberts, D. L., Meyer, M. C., Bernatchez, J. 2009. In *Science*. 325, 859–862. DOI: 10.1126/science.1175028.

Cowan, F. 1987. *Heat-treating Experiments with Onondaga Chert: Preliminary Results*. Ethnoarchaeology Graduate Course. Buffalo: State University of New York.

Crabtree, D. E., Butler, B. R. 1964. In *Tebiwa* vol. 7, No. 1, 1–6.

Domanski, M., Webb, J., Glaisher, R., Gurba, J., Libera, J., Zakoscielna, A. 2009. In *Journal of Archaeological Sciences,* 36, 1400–1408. DOI: 10.1016/j.jas.2009.02.002.

Domanski, M., Webb, J. 2007. In *Lithic Technology* (32), 153–194.

Fiers, G., Halbrucker, E., De Kock, T., Vandendriessche, H., Crombé, P., Cnudde, V. 2021. In *Lithic Technology* vol. 46, No. 1, 1–19. DOI: 10.1080/01977261.2020.1805215.

Flenniken, J. J., Garrison, E. G. 1975. In *Journal of field archaeology* (2), 125–131.

Frick, J. A., Hoyer, C. T., Herkert, K., Floss, H. 2012. In *Anthropologie* (50), 295–321.

Fukuda, J., Nakashima, S. 2008. In *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* (103), 112–115.

Goder-Goldberger, M., Weiner, S., Barzilai, O., Boaretto, E. 2017. In *Journal of Archaeological Science*. Report. (12), 173–182. http://dx.doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.01.041.

Griffiths, D. R., Bergman, C. A., Clayton, C. J., Ohnuma, K., Robins, G. V. 1987. In *The Human Uses of Flint and Chert. Proceedings of the Fourth International Flint Symposium Held at Brighton Polytechnic*. 10–15 April 1983, Cambridge: Cambridge University Press, 43–52.

Gurova, M., Andreeva, P., Nikolov, A., Barbov, B., Kostadinova-Avramova, M. 2020. In *Bulgarian e-Journal of Archaeology* (10.1), 111–141.

Holyoke, K. R., Blair, S. E., Shaw, C. S. 2020. In *Journal of Anthropological Archaeology* (60), 1–15. DOI: 10.1016/j.jaa.2020.101229.

Mandeville, M. D. 1973. In *Plains Anthropologist* (18), 177–202.

Mandeville, M. D., Flenniken, J. J. 1974. In *Plains Anthropologist* (19), 146–148.

Mercieca, A., Hiscock, P. 2008. In *Journal of Archaeological Science* (35), 2634–2639.

Milot, J., Siebenalle, L., Beziat, D., Lea, V., Schmidt, P., Binder, D. 2017. In *Archaeometry* (59), 417–434. DOI: 10.1111/arcm.12256.

Moník, M., Hadraba, H., Milde, D., Chlup, Z., Nerudová, Z., Schnabl, P. 2021. In *Archaeological and Anthropological Sciences* (13), 1–14. DOI: 10.1007/s12520-021-01388-z.

Moník, M., Nerudová, Z., Schnabl, P. 2021. In *Journal of Archaeological Sciences*. Report (37), 1–18. DOI: 10.1016/j.jasrep.2021.102920.

Mraz, V., Fisch, M., Eren, M. I., Lovejoy, C. O., Buchanan, B. 2019. In *Scientific Reports* vol. 9, 1–8. DOI: 10.1038/s41598-019-51139-3.

Murray, J. K., Harris, J. A., Oestmo, S., Martin, M., Marean, C. W. 2020. In *Journal of Archaeological Sciences*. Report 34, 1–12. DOI: 10.1016/j.jasrep.2020.102622.

Nickel, K. G., Schmidt, P. 2022. In *PLoS ONE* (17). DOI: 10.1371/journal.pone.0278643.

Olausson, D. S. 1983. In *Proceedings of the Prehistoric Society* (49), 1–13.

Oufakir, A., Khouchaf, L. 2023. In *Crystals*. (13), 1–13. https:// doi.org/10.3390/cryst13040647.

Pargeter, J., Schmidt, P. 2020. In *Journal of Archaeological Sciences: Reports* (30), 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102203.

Patterson, L.W. 1979. In *Plains Anthropologist* 24, 255–260.

Richter, D. 2007. In *Geoarchaeology: An International Journal* vol. 22, No. 6, 671–683. DOI: 10.1002/gea.20180.

Rick, J., Chappell, S. 1983. In *Lithic Technology*. Vol. 12, no. 3, 69–80.

Sahle, Y., Moník, M., Ahmed, S., Hadraba, H., Chlup, Z., Šiška, F., Kučera, L., Souron, A., Brandt, S.A., Arthur, K.W. 2025. In *Scientific Reports* 15. DOI: 10.1038/s41598-025-97207-9.

Santianello, F., Berloffa, A., Grimaldi, S., Maffei, S., Pedrotti, A., Gialanella, S. 2021. In *Journal of Cultural Heritage* (47), 117–122. DOI: 10.1016/j.culher.2020.10.004.

Santaniello, F., Grimaldi, S., Pedrotti ,A., Gialanella, S. 2016. In *Quaternary International* vol. 402, 80–89. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.08.006.

Schmidt, P. 2020. In Oxford research encyclopedia of anthropology. Oxford University Press, DOI: 10.1093/acrefore/9780190854584.013.45.

Schmidt, P. 2014. In *Archaeological and Anthropological Sciences* (6), 107–112. doi:10.1007/s12520-013-0162-3.

Schmidt, P., Buck, G., Berthold, C., Lauer, C., Nickel, K. G. 2019. In *Archaeological and Anthropological Sciences* (11), 2489–2506. DOI: 10.1007/s12520-018-0710-y.

Schmidt, P., Masse, S., Laurent, G., Slodczyk, A., Le Bourhis, E., Perrenoud, C., Livage, J., Fröhlich, F. 2012. In *Journal of Archaeological Sciences* (39), 135–144. DOI: 10.1016/j.jas.2011.09.012.

Schmidt, P., Moralam A. 2018. In *Archaeometry* (60), 885–897. DOI: 10.1111/arcm.12358.

Schmidt, P., Paris, C., Bellot-Gurlet, L. 2016. In *Archaeological and Anthropological Sciences* (8), 839–848. DOI: 10.1007/s12520-015-0259-y.

Schmidt, P., Spinelli Sanchez, O., Kind, C.-J. 2017. In *PLoS ONE* (12). DOI: 10.1371/journal.pone.0188576.

Sunseri, J. U., Delage, C. D. 2016. In *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* vol. 16, No. 3, 51–64. DOI: 10.5281/zenodo.160949.

Weiner, S., Brumfeld, V., Marde,r O., Barzilai, O. 2015. In *Journal of Archaeological Sciences*. (54), 45–53. http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2014.11.023.

Yonekura, K. 2010. In *Asian Perspectives* vol. 49, No. 2, 348–362. DOI: 10.1353/asi.2010.0011.

About the Authors:

Karmanov Victor N. Candidate of Historical Sciences. Institute of Language, Literature and History of the Komi Scientifc Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Kommunisticheskaya str., 26. Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation; vkarman@bk.ru

Makarov Aleksandr S. Institute of Language, Literature and History of the Komi Scientifc Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Kommunisticheskaya str., 26. Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation; makarov_as@bk.ru

Статья поступила в журнал 04.03.2026 г.
Статья принята к публикации 06.04.2026 г.
Авторы внесли равноценный вклад в работу