

Возможности неразрушающего анализа каменных артефактов на примере материалов позднепалеолитических комплексов Южного Приангарья и Верхней Лены

И. М. Бердников, И. С. Шегутов, Д. П. Золотарёв, А. Б. Спасибко, Н. Е. Бердникова*

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Представлены результаты неразрушающего анализа каменных артефактов из кремнистых пород с сарганских местонахождений рек Белой и Верхней Лены. В качестве основных методов выбраны рентгенофлуоресцентный анализ, проведенный при помощи портативного прибора (ПРФА), и геометрико-морфометрический анализ трехмерных моделей. По результатам ПРФА установлено, что кремнистые породы бельской и верхнеленской групп имеют существенное отличие и разное происхождение. Подчеркнуто, что один образец с Верхней Лены по химическому составу соответствует бельской группе, что позволяет выдвинуть версию о его импортном характере. Отмечено, что анализ трехмерных моделей также продемонстрировал свою эффективность, но наиболее полезным он будет только при расширении выборки и методов.

Ключевые слова: Байкало-Енисейская Сибирь, верхний палеолит, каменные индустрии, кремнистые породы, рентгенофлуоресцентный анализ, ПРФА, анализ трехмерных моделей.

Для цитирования: Возможности неразрушающего анализа каменных артефактов на примере материалов позднепалеолитических комплексов Южного Приангарья и Верхней Лены / И. М. Бердников, И. С. Шегутов, Д. П. Золотарёв, А. Б. Спасибко, Н. Е. Бердникова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Геоархеология. Этнология. Антропология. 2023. Т. 45. С. 26–54. <https://doi.org/10.26516/2227-2380.2023.45.26>

Possibilities of Non-destructive Analysis of Stone Artifacts Using the Example of Materials from the Late Paleolithic Assemblages of the Southern Angara Region and Upper Lena

I. M. Berdnikov, I. S. Shegutov, D. P. Zolotarev, A. B. Spasibko, N. E. Berdnikova*

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The results of non-destructive analysis of stone artifacts from siliceous rocks from the Late Upper Paleolithic (LUP) sites of the Belaya and Upper Lena Rivers are presented. X-ray fluorescence analysis carried out using a portable device (pXRF) and geometric-morphometric analysis of 3D models were selected as the main methods. The purpose of pXRF was to highlight criteria for differentiating rocks from different sites, issues of searching for sources of raw materials, including the problem of identifying local and non-local components in archaeological complexes, as well as the possibilities of this method in expanding the source base and geography of research. To do this, we selectively analyzed materials from two archaeological sites: 1) Maltinka 1 on the Belaya River (36 samples), and 2) Makarovo 2 on the Upper Lena (12 samples), as well as rock pieces collected near the archaeological site Sosnovyi Bor on the Belaya River. The method of studying 3D models of artifacts we used on a limited collection of the Maltinka 1 site (11 samples) to test how promising it is to use geometric-morphometric analysis in relation to specific LUP materials of Baikal-Yenisei Siberia. Based on the pXRF results, it was established that the siliceous rocks of the Belaya River and Upper Lena collection have significant differences and various origins. Most of the artifacts and rock pieces from Belaya River demonstrate certain similarities in chemical composition. It is concluded that these are local siliceous rocks originating from the deposits of the Lower Cambrian Angara Formation, the outcrops of which are found in many areas of the Belaya River valley. Samples from the Makarovo 2 site show greater variability in chemical composition. It has been suggested that the source for them could be the pebble horizons of the ancient Manzurka Alluvium. One sample from the Upper Lena corresponds in chemical composition to the Belaya collection, which allows us to put forward a version about its imported nature. However, this hypothesis requires testing by expanding collections of artifacts and raw material sources. As a result of the 3D analysis of cores and core preforms, it was established that the samples are quite similar in morphological characteristics, which indicates a high degree of standardization in the production of bifacial blanks. This method has been demonstrated to be effective but is most useful only when the sample and methodologies are expanded.

Keywords: Baikal-Yenisei Siberia, Upper Paleolithic, stone industries, siliceous rocks, X-ray fluorescence analysis, pXRF, analysis of three-dimensional models.

For citation: Berdnikov I. M., Shegutov I. S., Zolotarev D. P., Spasibko A. B., Berdnikova N. E. Possibilities of Non-destructive Analysis of Stone Artifacts Using the Example of Materials from the Late Paleolithic Assemblages of the Southern Angara Region and Upper Lena. *Bulletin of the Irkutsk State University. Geoarchaeology, Ethnology, and Anthropology Series*. 2023, Vol. 45, pp. 26–54. <https://doi.org/10.26516/2227-2380.2023.45.26> (in Russ.)

*Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
See the last page of the article for full author information.

Введение

В современной археологии методы неразрушающего анализа артефактов имеют первостепенное значение, так как они позволяют обеспечить наилучшую сохранность коллекций. Перспективными и относительно новыми методами, не получившими пока массового применения в российской археологии, являются рентгеновская флуоресцентная спектроскопия с использованием портативного прибора (далее – ПРФА) [X-Ray Fluorescence ... , 2011; Handheld XRF ... , 2012] и анализ трехмерных моделей при помощи специального программного обеспечения [Wyatt-Spratt, 2022].

Если обращаться к исследованиям каменного века, то наиболее активно ПРФА применяется для определения элементного и химического состава изделий, выполненных из кремнистых пород и обсидиана [напр.: Geochemical source ... , 2017; Tykot, Martin, 2020], а также керамических сосудов [напр.: Menne, Holzheid, Neilmann, 2020] с целью выявления источников сырья и характера стратегий адаптаций охотников-собирателей, предметов импорта, свидетельствующих о миграциях и культурных связях разных групп охотников-собирателей. Анализ трехмерных моделей используется в основном в отношении каменных артефактов и позволяет диагностировать различные аспекты культурно-технологических традиций [Применение трехмерного ... , 2020; Valletta, Dag, Grosman, 2021; Использование трехмерных ... , 2022].

Проблемы изучения технологических традиций, адаптации и миграций не менее актуальны и для каменного века Байкало-Енисейской Сибири. В настоящем исследовании мы впервые используем методы ПРФА и анализа трехмерных моделей артефактов, и эта работа, как мы надеемся, откроет новую страницу региональной геоархеологии. Первоочередная цель – выработка методики и определение перспектив указанных методов в изучении каменных изделий позднего этапа верхнего палеолита, выявление их преимуществ и недостатков.

Важную роль играет метод ПРФА, который позволяет определить химический состав пород. Однако в задачи нашего исследования не входит определение всех факторов их генезиса, так как это прерогатива профильных специалистов. Для нас первостепенными являются выделение критериев для дифференциации пород с разных местонахождений и проявлений, вопросы поиска источников сырья, включая проблему выявления местных и инородных компонентов в археологических комплексах, и методические возможности ПРФА при расширении источниковой базы и географии исследований. Для решения этих задач мы выборочно проанализировали материалы двух археологических объектов (Мальтинка 1 на р. Белой и Макарово 2 на Верхней Лене) и отдельности породы, собранные вблизи еще одного археологического местонахождения (Сосновый Бор) на р. Белой.

Метод изучения трехмерных моделей артефактов использован нами на ограниченной выборке местонахождения Мальтинка 1 с целью проверить, насколько перспективно использовать геометрико-морфометрический анализ 3D-моделей в отношении специфичных материалов сартанского времени.

Следует также заметить, что в рамках настоящей работы мы не приводим детального обсуждения морфологических и типологических характеристик археологических коллекций, а также стратиграфических ситуаций, так как это предмет самостоятельных исследований. Материалы Мальтинки 1, проанализированные при помощи атрибутивного анализа, представлены в одной из статей,

которая запланирована к публикации в ближайших выпусках журнала «Вестник Омского университета. Серия: Исторические науки». Комплексы Макарово 2, в свою очередь, подробнейшим образом охарактеризованы в монографии М. П. Аксёнова «Палеолит и мезолит Верхней Лены» [2008, с. 134–149].

Материалы и методы

Материалы. Местонахождение Мальтинка 1, открытое М. М. Герасимовым в 1929 г., входит в территорию правобережного мальтинского геоархеологического полигона и расположено близ устья р. Мальтинки, правого притока р. Белой, на участке террасовидной поверхности с относительными отметками 20–42 м (рис. 1). В процессе ограниченных по площади раскопок (15 м²), проведенных И. Л. Лежненко в 1977 и 1983 гг. [Лежненко, 1978, 1987], на местонахождении была выявлена многослойная ситуация и выделено четыре культуросодержащих горизонта (далее – к. г.). Наиболее представительными являются материалы горизонтов 2 и 3, которые по аналогии с датированными комплексами р. Белой [Soil Formation ... , 2021] отнесены нами к двум хроносрезам: позднему (~14,7–12,8 тыс. кал. л. н.) и среднему (~18,6–17,6 тыс. кал. л. н.) сартану соответственно, что в региональной археологической периодизации соответствует позднему этапу верхнего палеолита [Средний и поздний этапы ... , 2021]. Общее количество находок в указанных горизонтах составило 2502 ед. Для комплексов характерны микропластинчатое расщепление, терминально-краевые (торцовые), в том числе клиновидные, плоские и призматические нуклеусы и значительная доля орудий.

Выборка для ПРФА включает 36 предметов (21 из к. г. 2, 15 – из к. г. 3) – орудий, нуклеусов и их преформ, сырьем для которых служили кремнистые по облику породы (рис. 2, 3). Внешний облик пород имеет вариации и характеризуется сероватой, серовато-коричневой светлой и темной окраской, пелитоморфной (преимущественно) или стекловатой (редко) структурой и слоистой текстурой.

Местонахождение Макарово 2, открытое в 1967 г. С. М. Цейтлиным и раскопанное в 1968, 1969 и 1971 гг. под руководством М. П. Аксёнова, расположено на правом берегу р. Лены в 7 км на северо-запад от пос. Качуг и приблизительно в 15 км ниже по течению р. Лены от устья р. Манзурки (левого ленского притока) (см. рис. 1). В гипсометрическом отношении оно позиционировано на выположенной поверхности конуса выноса с отметками 14–15 м относительно уреза реки. Здесь вскрыто около 180 м² и так же, как и на Мальтинке 1, зафиксирована многослойная ситуация [Аксёнов, 2009, с. 134–137]. В анализ нами взяты материалы к. г. 2 и 4, которые следует датировать поздним сартаном, опираясь на данные по аналогичным комплексам Байкало-Енисейской Сибири и радиоуглеродные даты по к. г. 3, демонстрирующие возраст от 13 860±400 до 13 450±650 тыс. кал. л. н. [Soil Formation ... , 2021, Table A1]. Общее число находок в к. г. 2 составило 2341 ед., в к. г. 4 – 60 ед. Комплексы характеризуются микропластинчатым расщеплением с преобладанием клиновидных и призматических форм нуклеусов, а среди орудий выделяются серия трансверсальных резцов верхоленского типа и единственная для этого времени находка рыболовного грузила [Аксёнов, 2009, с. 143–144].



Рис. 1. Карта с указанием места расположения местонахождений:
1 – Мальтинка 1, 2 – Сосновый Бор, 3 – Макарово 2

Fig. 1. Map indicating the location of the sites:
1 – Maltinka 1; 2 – Sosnovyi Bor; 3 – Makarovo 2

Для проведения ПРФА отобрано 12 изделий (рис. 4), нуклеусов и преформ из светлоокрашенных и темных (серой до черной и серовато-зеленой окраски) кремнистых пород с однородной (преимущественно) или тонкослоистой текстурой, пелитоморфной и стекловатой структурой.

В целях определения возможных источников сырья, в районе местонахождения Сосновый Бор, находящегося в 6 км ниже по течению р. Белой от Мальтинки 1 (на том же берегу), собраны отдельности кремнистой породы, прослой которой фиксируются в отложениях доломитов и известняков нижнего кембрия, хорошо обнаженных на данном участке. Для ПРФА-анализа выбраны четыре крупных куска породы темно-серой окраски со слоистой текстурой (рис. 5).



Рис. 2. Мальтинка 1, к. г. 2:

1, 2, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 17 – призматические одноплощадочные монофронтальные нуклеусы;
 3, 6, 7, 10, 11 – терминально-краевые одноплощадочные нуклеусы; 14, 15, 20 – концевые скребки;
 16 – преформа терминально-краевого нуклеуса; 18 – нож с бифасиальной обработкой; 19 –
 остроконечник; 21 – боковой скребок

Fig. 2. Maltinka 1, layer 2:

1, 2, 4, 5, 8, 9, 12, 13, 17 – prismatic single-platform cores;
 3, 6, 7, 10, 11 – narrow-faced single-platform cores; 14, 15, 20 – endscrapers; 16 – narrow-faced core
 preform; 18 – knife with bifacial processing; 19 – point; 21 – sidescraper

Для 3D-моделирования и последующего анализа отобрано 11 предметов из к. г. 2 местонахождения Мальтинка 1 – 5 нуклеусов и 6 преформ (рис. 6).

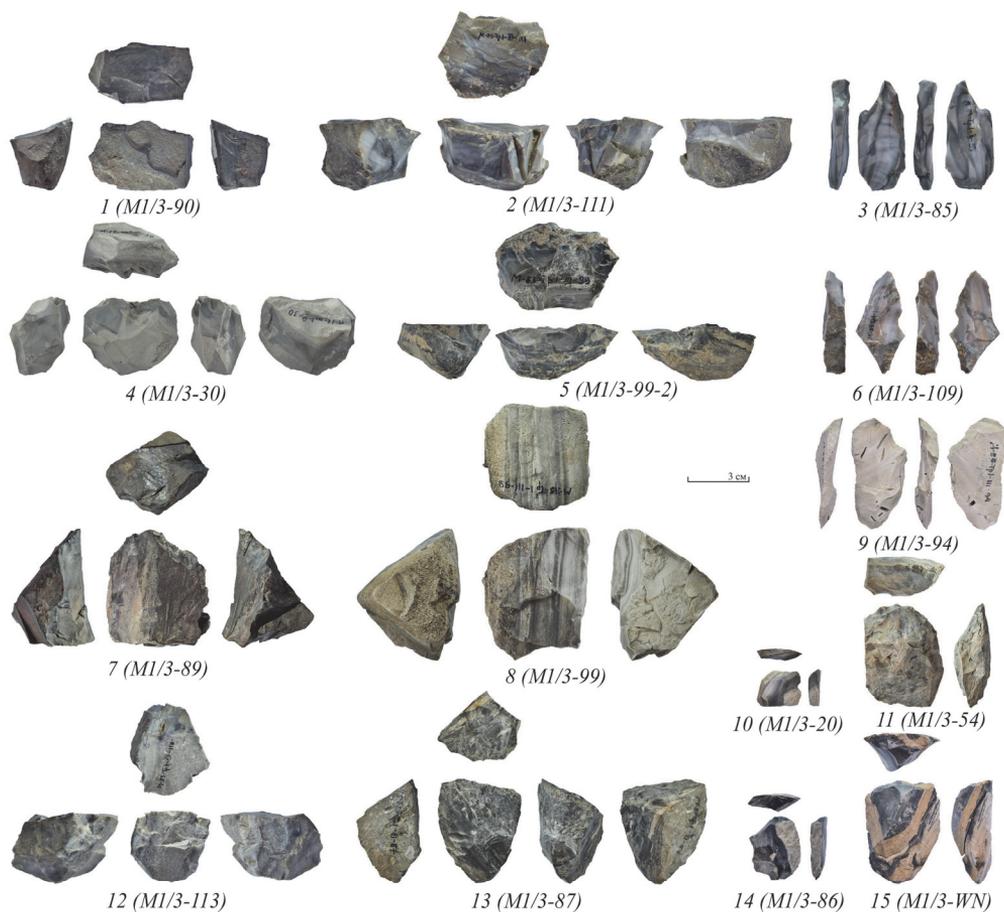


Рис. 3. Мальтинка 1, к. г. 3: 1 – преформа призматического нуклеуса; 2, 4, 5, 7, 8, 12, 13 – призматические одноплощадочные монофронтальные нуклеусы; 3, 6 – двугранные резцы; 9 – многофасеточный резец; 10, 11, 14, 15 – концевые скребки

Fig. 3. Maltinka 1, layer 3: 1 – prismatic core preform; 2, 4, 5, 7, 8, 12, 13 – prismatic single-platform cores; 3, 6 – dihedral burins; 9 – multi-faceted burin; 10, 11, 14, 15 – endscrapers

ПРФА. Рентгенофлуоресцентный анализ проведен при помощи портативного рентгенофлуоресцентного спектрометра Olympus Vanta M с рентгеновской трубкой 4 Вт (ускоряющее напряжение 50 кВ) и родиевым (Rh) анодом. Для измерений был выбран режим Geochem (3-Beam) («Геохимия (3 луча)» с заводской калибровкой) с экспозицией на первые два луча 50 с, на третий – 30 с.

Образцы измерялись с коллимацией пучка до 3 мм в закрытой камере (рабочая станция с экранированной защитой) с одной (при относительно однородной текстуре) или с двух-трех сторон с последующим усреднением показателей. Уровень основных петрогенных оксидов высчитывался автоматически при помощи встроенной функции ПО Vanta в режиме реального времени. Содержание железа (Fe) пересчитывалось на Fe_2O_3 . Содержание Na_2O не измерялось, так как диапазон анализатора Vanta M не включает элементы легче Mg. Данные приводятся только по оксидам, остальные элементы, которые были определены в незначительном содержании, в рамках настоящего исследования не рассматриваются.

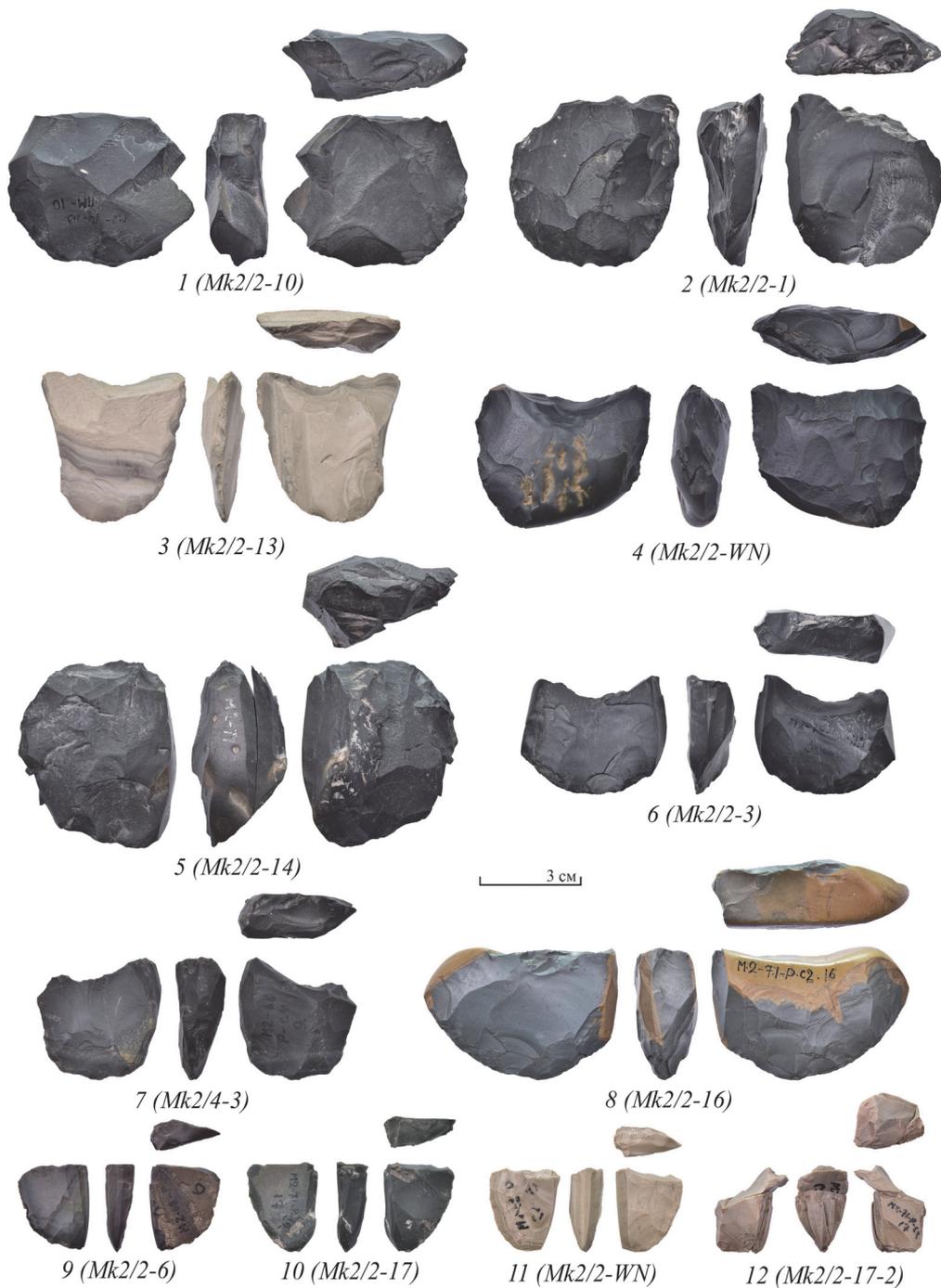


Рис. 4. Макарово 2, к. г. 2 (1–6, 8–12), к. г. 4 (7):
 1–5 – преформы терминально-краевых нуклеусов; 6–12 – терминально-краевые нуклеусы
 Fig. 4. Makarovo 2, layer 2 (1–6, 8–12), layer 4 (7):
 1–5 – narrow-faced core preforms; 6–12 – narrow-faced cores



Рис. 5. Сосновый Бор: 1–4 – отдельные породы, собранные в районе обнажений отложений ангарской свиты

Fig. 5. Sosnovyi Bor: 1–4 – rock pieces collected in the area of outcrops of sediments of the Angara Formation

Обработка результатов и дальнейший их анализ проводились при помощи ПО MS Excel и StatSoft Statistica 12 и в соответствии с рекомендациями по интерпретации геохимических данных при изучении осадочных пород [Юдович, Керрис, 2000; Интерпретация геохимических ... , 2001]. В качестве основного метода выбран анализ петрохимических модулей и их отношения, за исключением натриевого и щелочного, ввиду отсутствия возможности измерить уровень Na. Дополнительно проверена возможность анализа содержания CaO и его отношения к другим оксидам.

Анализ 3D-моделей. Как правило, при анализе трехмерных моделей нуклеусов, особенно торцовых, используются методы, направленные на выявление вариаций угла между площадкой и поверхностью скалывания, метрических параметров ядрища и негативов сколов, их соотношения и т. д. [Valletta, Dag, Grosman, 2021; Использование трехмерных ... , 2022]. Однако мы решили подойти к вопросу изучения таких нуклеусов с неожиданной стороны и проанализировать их в совокупности с преформами в рамках геометрико-морфометрического анализа, который показывает вариации в морфологии артефактов и предоставляет возможность сравнения их форм независимо от размера [Применение трехмерного ... , 2020]. Данная методика была выбрана в том числе потому, что на позднем этапе верхнего палеолита роль универсальной заготовки играл бифас, из которого после рассечения или усечения, используя минимальные усилия,

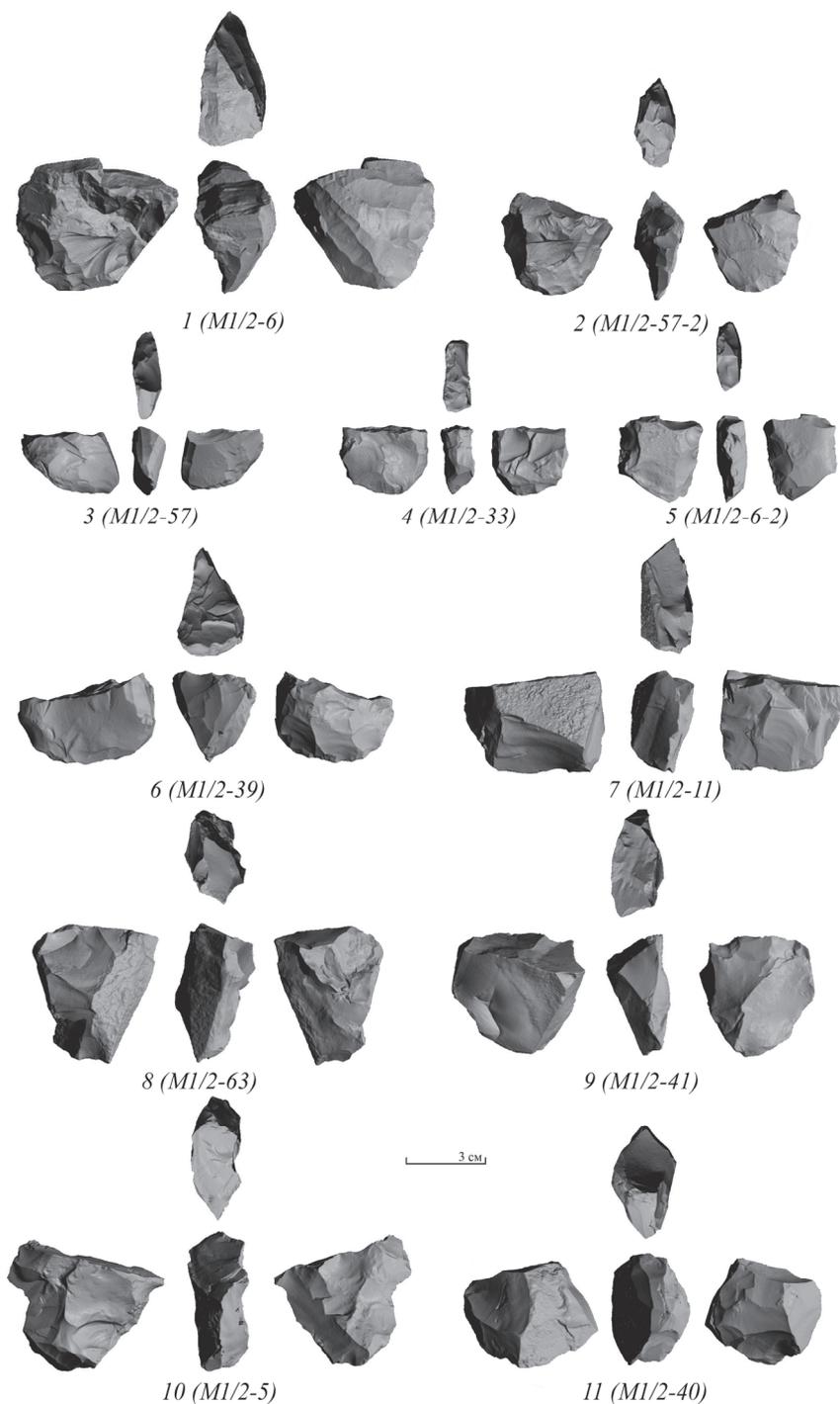


Рис. 6. Мальтинка 1, к. г. 2. Трехмерные модели артефактов (изображения, выгруженные из программы AGMT3-D): 1–4, 6 – нуклеусы, 5, 7–11 – преформы

Fig. 6. Maltinka 1, layer 2. Three-dimensional models of artifacts (images uploaded from the AGMT3-D program): 1–4, 6 – cores, 5, 7–11 – preforms

довольно быстро можно было получить преформу практически любого орудия и клиновидного нуклеуса. Поэтому мы предположили, что использование геометрико-морфометрического анализа для сравнения двусторонне обработанных заготовок и нуклеусов может дать определенный результат.

Предварительный этап включал сканирование артефактов при помощи 3D-сканера Range Vision Spectrum 3.1 с последующим переводом получившихся трехмерных моделей из формата .stl в формат .wrl в программе MeshLab. Следующие этапы исследования выполнены посредством аналитических инструментов и алгоритмов программного обеспечения Artifact GeoMorph Toolbox 3-D 3.1 (AGMT3-D) [Herzlinger, Goren-Inbar, Grosman, 2018].

ПРФА: бельская группа

Измерения, проведенные на материалах местонахождения Мальтинка 1 и Сосновый Бор (бельская группа), продемонстрировали следующие результаты (табл. 1). Большинство оксидов обнаружили достаточный уровень для их дальнейшего анализа на основе петрохимических модулей, значения которых представлены в табл. 2.

Данные по гидролизатному модулю (ГМ), который является наиболее универсальным и позволяет дифференцировать породы по соотношению кремнезема и продуктов гидролиза, свидетельствуют, что все образцы демонстрируют значения $< 0,3$. Это позволяет отнести их к хемотипам силитов и псевдосилитов по классификации Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис [2000, с. 48]. При этом 36 образцов следует относить к классам гиперсилитов (преимущественно) и суперсилитов, которые имеют значения $< 0,05$ и $0,06-0,10$ соответственно. На общем фоне выделяются только четыре образца. Из них два (M1/3-89 и M1/3-90) попадают в класс нормосилитов ($0,11-0,20$), один (M1/2-1) – в класс миосилитов ($0,21-0,30$). Еще один образец (M1/2-34), учитывая высокое содержание MgO, следует относить к хемотипу псевдосилитов. По литологической классификации образцы представляют собой силициты [Интерпретация геохимических ... , 2001, с. 103], причем образцы M1/3-89 и M1/3-90 являются слабоглинистыми, а M1/2-1 и M1/2-34 – глинистыми силицитами, для которых характерны значения $0,10-0,20$ и $0,20-0,30$ соответственно.

Значения алюмокремниевого модуля (АМ), представляющего отношение глинозема и кремнезема, в целом коррелируют с показателями ГМ и демонстрируют, что большинство силитов бельской группы гипоглиноземистые ($< 0,05$), за исключением образцов M1/2-1, M1/2-38, M1/2-59 и M1/3-90, которые следует относить к категории нормоглиноземистых ($0,05-0,20$). Образец M1/2-34 является нормоглиноземистым псевдосилитом ($0,10-0,25$) [Юдович, Кетрис, 2000, с. 67]. Литологически, как показал и ГМ, почти все образцы относятся к кремнистым породам, т. е. силицитам, однако предмет под шифром M1/2-34 по значению АМ соответствует нижнему порогу, установленному для глинистых пород, – $0,22$ [Интерпретация геохимических ... , 2001, с. 104].

Фемический модуль (ФМ), который отражает отношение суммарного железа в совокупности с MnO и MgO к кремнезему, показывает, что все образцы, определенные как силиты, следует записать в категорию гипо- (преимущественно) и нормофемических (образцы M1/2-1, M1/2-38, M1/2-57, M1/2-59, M1/3-89 и SB4), значения которых составляют $< 0,03$ и $0,03-0,10$ соответственно. Образец M1/2-34 относится к суперфемическим псевдосилитам ($0,11-0,15$) [Юдович, Кетрис, 2000, с. 71].

Таблица 1

Мальтинка 1, Сосновый Бор. Содержание основных петрогенных оксидов (масс. %) в каменных артефактах и кусках породы (группировка по убыванию содержания SiO₂)

Table 1

Maltinka 1, Sosnovyi Bor. Content of main petrogenic oxides (wt. %) in stone artifacts and rock pieces (grouping by descending SiO₂ content)

Шифр образца	Находка	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃ (Σ)*	ZnO	LE и пр.**	Всего
Мальтинка 1, к. г. 2														
M1/2-39	Нуклеус	<***	1,205	82,853	0,014	<	0,058	0,116	0,047	0,006	0,328	0,001	15,372	100
M1/2-10	Нуклеус	<	0,741	78,338	0,011	<	0,051	0,096	0,035	0,008	0,085	0,001	20,634	100
M1/2-6	Нуклеус	<	0,356	77,962	<	<	<	0,076	<	0,005	0,036	0,002	21,564	100
M1/2-57-2	Нуклеус	<	0,950	76,347	<	<	<	0,105	<	0,007	0,088	0,001	22,502	100
M1/2-57	Нуклеус	<	0,457	72,898	<	<	<	0,077	<	0,009	4,021	0,002	22,536	100
M1/2-33	Нуклеус	<	0,998	72,391	<	<	<	0,088	0,064	0,013	0,456	0,001	25,987	100
M1/2-28	Скребок	0,752	2,730	72,229	0,071	0,060	0,086	0,505	0,032	0,010	0,526	0,001	22,997	100
M1/2-3	Нож-бифас	<	0,821	71,549	<	0,076	0,089	0,575	0,109	0,007	0,061	0,001	26,712	100
M1/2-50	Нуклеус	0,611	3,013	71,114	0,032	0,164	0,149	0,158	0,040	0,009	0,294	0,002	24,413	100
M1/2-15	Скребок	<	0,365	69,510	<	0,461	0,020	0,082	<	0,006	0,191	0,002	29,363	100
M1/2-126	Нуклеус	<	0,457	68,731	<	<	<	0,125	0,043	0,009	0,068	0,002	30,566	100
M1/2-72	Нуклеус	0,412	1,165	68,096	<	<	0,019	0,133	<	0,009	0,142	<	30,022	100
M1/2-5	Преформа	<	0,700	66,941	<	0,035	0,052	0,138	0,061	0,010	0,156	0,002	31,904	100
M1/2-36	Нуклеус	0,423	1,531	66,814	<	0,029	0,057	0,125	0,037	0,010	0,286	0,001	30,686	100
M1/2-66	Нуклеус	<	0,137	65,917	<	<	<	0,068	<	0,010	0,054	0,001	33,813	100
M1/2-58	Нуклеус	0,655	3,054	65,088	0,057	0,213	0,105	0,173	<	0,009	0,433	0,001	30,212	100
M1/2-37	Нуклеус	<	0,650	60,330	0,020	0,600	0,030	0,100	0,090	0,004	0,450	0,002	37,725	100
M1/2-59	Скребок	0,673	3,150	54,085	0,021	<	0,095	0,197	0,075	0,006	0,361	0,002	41,335	100
M1/2-38	Нуклеус	0,350	2,913	53,918	0,020	0,040	0,120	0,290	0,090	0,010	0,480	0,002	41,767	100
M1/2-1	Остроконечник	<	9,659	51,685	0,019	0,113	2,747	0,243	0,142	0,024	1,617	0,007	33,744	100
M1/2-34	Скребок	5,121	10,244	45,665	<	<	2,893	4,560	0,615	0,070	2,000	0,010	28,821	100
Мальтинка 1, к. г. 3														
M1/3-20	Скребок	0,415	0,985	82,221	<	<	<	0,083	<	0,004	0,099	0,001	16,192	100
M1/3-54	Скребок	0,074	0,795	80,051	0,032	<	0,003	0,107	0,043	0,009	0,228	0,001	18,656	100

Окончание табл. 1

Шифр образца	Находка	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃ (Σ)*	ZnO	LE и пр.**	Всего
M1/3-85	Резец	<	0,079	78,853	<	<	<	0,084	0,027	0,012	0,050	0,001	20,895	100
M1/3-113	Нуклеус	0,215	0,934	78,118	<	<	<	0,093	0,030	0,009	0,079	0,001	20,521	100
M1/3-109	Резец с выемкой	1,208	2,554	76,571	0,037	0,339	0,097	0,090	0,067	0,005	0,095	0,001	18,935	100
M1/3-87	Нуклеус	0,273	1,083	76,130	0,030	0,019	0,005	0,121	0,056	0,009	0,115	0,001	22,157	100
M1/3-30	Нуклеус	<	0,782	74,676	<	<	<	0,144	0,147	0,011	0,054	0,002	24,184	100
M1/3-89	Нуклеус	0,490	2,112	73,175	0,016	0,173	0,043	0,154	0,058	0,007	5,717	0,003	18,051	100
M1/3-WN	Скребок	0,670	0,704	70,984	0,041	0,269	0,025	0,976	0,049	0,007	0,127	0,021	26,125	100
M1/3-99	Нуклеус	<	1,229	70,624	0,022	<	0,016	0,171	0,032	0,007	0,128	0,002	27,769	100
M1/3-94	Резец	<	1,149	63,957	<	<	0,021	0,149	0,062	0,010	0,290	0,002	34,359	100
M1/3-111	Нуклеус	0,392	1,284	60,788	0,038	0,823	0,123	0,447	0,049	0,007	0,569	0,001	35,480	100
M1/3-90	Преформа	1,144	3,307	57,018	0,026	0,274	0,113	0,242	0,078	0,015	3,336	0,002	34,446	100
M1/3-86	Скребок	<	0,485	50,107	0,603	<	<	0,163	0,029	0,016	0,133	0,001	48,463	100
M1/3-99-2	Нуклеус	<	0,625	47,046	0,399	<	<	0,123	0,044	0,010	0,113	0,001	51,638	100
Сосновый Бор, отдельности породы														
SB3	Порода	<	0,148	74,896	0,013	1,587	0,045	0,071	0,050	0,008	1,120	0,002	22,059	100
SB4	Порода	0,781	1,581	67,851	0,059	3,383	<	0,155	<	0,007	1,827	0,002	24,353	100
SB1	Порода	0,229	1,400	65,185	0,006	0,483	<	0,133	0,033	0,013	0,439	0,001	32,079	100
SB2	Порода	0,448	0,407	63,827	<	0,494	<	0,186	0,052	0,009	0,561	0,003	34,013	100

* Суммарное железо в пересчете на Fe₂O₃.

** Легкие (LE) и прочие элементы с незначительным содержанием, в том числе редкоземельные.

*** < – содержание элемента ниже предела обнаружения.

Таблица 2
Мальтинка 1, Сосновый Бор. Значения петрохимических модулей

Table 2

Maltinka 1, Sosnovyi Bor. Petrochemical module values

Шифр образца	Петрохимический модуль					
	ГМ	АМ	ФМ	ТМ	КМ	ЖМ
M1/2-39	0,02	0,01	0,00	0,04	0,05	0,27
M1/2-10	0,01	0,01	0,00	0,05	0,07	0,12
M1/2-6	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
M1/2-57-2	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,10
M1/2-57	0,06	0,01	0,06	0,00	0,00	8,82
M1/2-33	0,02	0,01	0,01	0,06	0,00	0,44
M1/2-28	0,05	0,04	0,02	0,01	0,03	0,19
M1/2-3	0,01	0,01	0,00	0,13	0,11	0,07
M1/2-50	0,05	0,04	0,01	0,01	0,05	0,10
M1/2-15	0,01	0,01	0,00	0,00	0,06	0,54
M1/2-126	0,01	0,01	0,00	0,09	0,00	0,15
M1/2-72	0,02	0,02	0,01	0,00	0,02	0,13
M1/2-5	0,01	0,01	0,00	0,09	0,07	0,22
M1/2-36	0,03	0,02	0,01	0,02	0,04	0,19
M1/2-66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46
M1/2-58	0,05	0,05	0,02	0,00	0,03	0,14
M1/2-37	0,02	0,01	0,01	0,14	0,05	0,61
M1/2-59	0,07	0,06	0,02	0,02	0,03	0,11
M1/2-38	0,06	0,05	0,02	0,03	0,04	0,16
M1/2-1	0,22	0,19	0,03	0,01	0,28	0,17
M1/2-34	0,28	0,22	0,16	0,06	0,28	0,19
M1/3-20	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,10
M1/3-54	0,01	0,01	0,00	0,05	0,00	0,28
M1/3-85	0,00	0,00	0,00	0,34	0,00	0,59
M1/3-113	0,01	0,01	0,00	0,03	0,00	0,09
M1/3-109	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04
M1/3-87	0,02	0,01	0,01	0,05	0,00	0,11
M1/3-30	0,01	0,01	0,00	0,19	0,00	0,07
M1/3-89	0,11	0,03	0,08	0,03	0,02	2,64
M1/3-WN	0,01	0,01	0,01	0,07	0,04	0,18
M1/3-99	0,02	0,02	0,00	0,03	0,01	0,11
M1/3-94	0,02	0,02	0,00	0,05	0,02	0,25
M1/3-111	0,03	0,02	0,02	0,04	0,10	0,43
M1/3-90	0,12	0,06	0,08	0,02	0,03	0,99
M1/3-86	0,01	0,01	0,00	0,06	0,00	0,29
M1/3-99-2	0,02	0,01	0,00	0,07	0,00	0,18
SB3	0,02	0,00	0,02	0,33	0,31	5,70
SB4	0,05	0,02	0,04	0,00	0,00	1,16
SB1	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00	0,31
SB2	0,02	0,01	0,02	0,13	0,00	1,24

В соответствии с титановым модулем (ТМ), который строится на отношении содержания TiO_2 и Al_2O_3 , большинство образцов анализируемой группы попадают в категорию гипо- и нормотитанистых ($< 0,020$ и $0,020-0,080$ соответственно), два образца (M1/2-5 и M1/2-126) – супертитанистых ($0,081-0,120$) и еще пять (M1/2-3, M1/2-37, M1/3-85, M1/3-30 и SB3) – гипертитанистых [Юдович, Кетрис, 2000, с. 82].

Калиевый модуль (КМ), несущий информацию о распределении калия и алюминия, показывает, что подавляющее большинство образцов со значениями $< 0,10$ может содержать хлорит или плагиоклаз. В одном случае (образец M1/2-3) дополнительно могут присутствовать гидрослюда с хлоритом и, возможно, плагиоклаз (значения для них $0,10-0,30$). Еще три образца (M1/2-1, M1/2-34 и SB3) могут иметь в составе, помимо гидрослюд, ортоклаз, так как их значение превышает $0,3$ [Интерпретация геохимических ... , 2001, с. 106].

По значениям железного модуля (ЖМ), который показывает соотношение между железистыми и глиноземистыми продуктами гидролиза, больше половины образцов (22) относятся к категории гипожелезистых ($< 0,20$), 12 – норможелезистых ($0,20-0,70$) и один (M1/3-90) – супержелезистых ($0,71-1,00$). Оставшиеся 5 образцов (M1/2-57, M1/3-89, SB2, SB3 и SB4) демонстрируют повышенные значения ЖМ ($> 1,00$), что позволяет их определить в категорию гипержелезистых [Юдович, Кетрис, 2000, с. 103].

Опираясь на полученные данные, можно с уверенностью говорить о том, что все изученные образцы по химической классификации относятся к силитам и псевдосилитам (или силицитам по литологической). Содержание кремнезема (SiO_2) в них разное (от 46 до 83 масс. %) и далеко не во всех случаях коррелирует с содержанием глинозема. По последнему параметру большая часть образцов не выходит за пределы 2 масс. %, еще одна группа соответствует диапазону 2–4 масс. % Al_2O_3 , а в соответствии со значениями АМ они являются гипо- (преимущественно) и нормоглиноземистыми (см. табл. 2). По значениям ФМ практически все образцы попадают в категории гипо- и нормофемических, при этом около половины из них демонстрируют довольно высокие значения ЖМ ($> 0,20$), среди которых есть 5 образцов, отнесенных к гипержелезистым. Информацию по ТМ довольно сложно интерпретировать, так как его значения могут зависеть от множества факторов [Юдович, Кетрис, Рыбина, 2018], но пока какой-то определенной закономерности и корреляции этих значений с другими показателями мы не наблюдаем.

Особняком стоят образцы M1/2-1 и M1/2-34. Последний по хемотипу определен как псевдосилит (по повышенному содержанию MgO) – нормоглиноземистый, суперфемический, гипожелезистый. Образец M1/2-1, хоть и не идентичен, но по многим показателям близок к образцу M1/2-34. Отличием является уровень Mg, который оказался ниже предела обнаружения.

Сравнивая химический состав и значения петрохимических модулей артефактов из к. г. 2 и 3 Мальтинки 1, можно утверждать, что в целом для их изготовления использовалось похожее сырье, которое, в свою очередь, по многим параметрам близко кремнистым породам, собранным в районе расположенного неподалеку местонахождения Сосновый Бор. Модульные диаграммы ФМ-ГМ и АМ-ГМ¹ в обоих случаях показывают достаточно сильную положительную кор-

¹ Данное соотношение в геохимии редко используется, так как Al_2O_3 и так уже учитывается в модуле ГМ, и кому-то может показаться сомнительным полезность данной диаграммы, особенно если учесть, что картина в целом рисуется близкая модульной диаграмме ФМ-ГМ. Однако результаты показывают, что использование

реляцию, а большинство образцов, имеющих, по-видимому, общее происхождение, образуют довольно плотный кластер на диаграммах рассеяния (рис. 7). В него не попали только несколько образцов: M1/2-57, слабоглинистые силициты M1/3-89 и M1/3-90, кусок породы SB4, а также находящиеся дальше всех от основной группы M1/2-1 и M1/2-34. Последние явно отличаются от общей массы образцов, а сырье, из которого изготовлены артефакты, безусловно, имеет иное происхождение, однако ситуация с остальными породами выглядит не так однозначно. Если образцы M1/3-89 и M1/3-90 имеют слегка завышенные на общем фоне значения как ГМ, так и ФМ (а в одном случае и АМ), то образцы M1/2-57 и SB4 не попали в основную группу исключительно из-за повышенных показателей ФМ, что не обязательно должно исключать их схожесть с группой «массового сырья», так как эти аномалии могут быть связаны с локальным ожелезнением пород. Кроме того, не следует забывать, что образец SB4 отобран в том же месте, что и SB1–SB3.

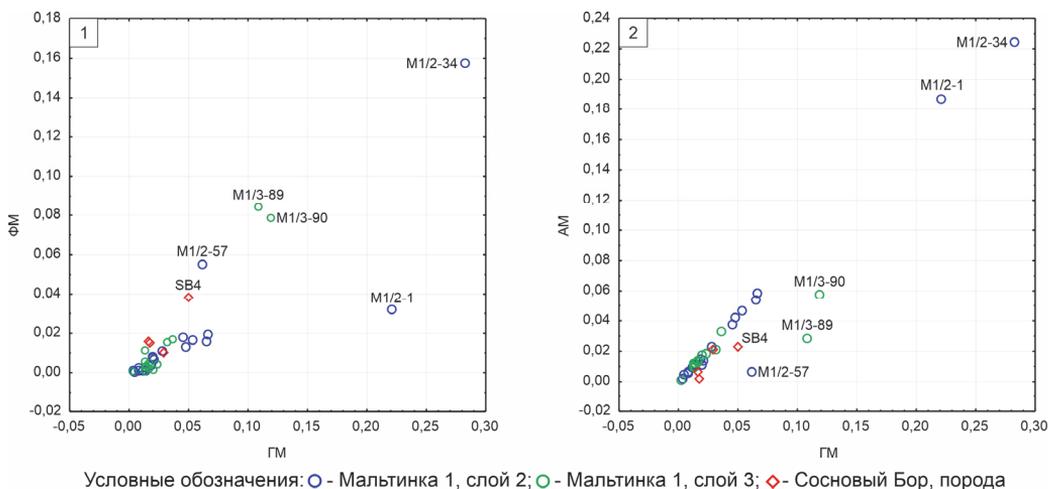


Рис. 7. Бельская группа кремнистых пород, модульные диаграммы:
1 – ФМ-ГМ; 2 – АМ-ГМ

Fig. 7. Belaya group of siliceous rocks, modular plots:
1 – FM-GM; 2 – AM-GM

Можно также отметить, что анализируемые породы преимущественно содержат хлорит или плагиоклаз (в одном случае с гидрослюдами). И лишь в отношении трех образцов можно предположить, что в их составе, наряду с гидрослюдами, может быть ортоклаз. Более подробная характеристика в данном случае невозможна, так как она осуществима только в совокупности с данными по другим модулям: натриевому (НМ), щелочному (ЩМ) и общей нормативной (нормированной) щелочности (НКМ) [Юдович, Кетрис, 2000, с. 73; Интерпретация геохимических ... , 2001, с. 106–108].

этого соотношения дает возможность скорректировать дисперсию, вызванную повышенным количеством суммарного железа, характер которого не установлен и не поддается систематизации, и четче выразить тренды кластерного анализа. Необходимую диаграмму, где значения параметров будут хорошо коррелировать, следует подбирать, исходя из имеющихся данных [Юдович, Кетрис, 2000, с. 111].

ПРФА: верхнеленская группа

По результатам измерений, проведенных на материалах местонахождения Макарово 2, можно видеть, что верхнеленская группа пород имеет свою специфику (табл. 3). Как и в предыдущем случае, они проанализированы при помощи петрохимических модулей (табл. 4).

По значениям ГМ большинство образцов (10) следует связывать с хемотипом силитов. Из них 3 (Mk2/2-13, Mk2/2-17-2 и Mk2/2-WN(2)) относятся к нормосилитам, 6 (Mk2/4-3, Mk2/2-9, Mk2/2-10, Mk2/2-14, Mk2/2-17 Mk2/2-WN) – к миоилитам и только один (Mk2/2-6) – к гиперсилитам. Оставшиеся два образца – Mk2/2-1 и Mk2/2-16 – имеют высокие показатели модуля и относятся к типу сиаллитов, классам нормо- (0,36–0,48, нормально-гидролизатных) и гипосиаллитов (0,30–0,35, пониженно-гидролизатных) соответственно [Юдович, Кетрис, 2000, с. 48]. Литологически только один образец (Mk2/2-6) соответствует силицитам, другие являются слабоглинистыми (Mk2/2-13, Mk2/2-17-2 и Mk2/2-WN(2)) с показателями в пределах 0,10–0,20 либо глинистыми (Mk2/4-3, Mk2/2-9, Mk2/2-10, Mk2/2-14, Mk2/2-17 и Mk2/2-WN) силицитами со значениями 0,20–0,30. Еще два образца (Mk2/2-1 и Mk2/2-16) следует относить к глинистым породам [Интерпретация геохимических ... , 2001, с. 103].

Данные по АМ демонстрируют довольно высокие его значения практически во всех случаях, за исключением образца Mk2/2-6, который является гипоглиноземистым силитом. Остальные силиты (9 образцов) относятся к категории нормоглиноземистых. Предметы под шифром Mk2/2-1 и Mk2/2-16 соответствуют категории нормоглиноземистых сиаллитов (0,20–0,35) [Юдович, Кетрис, 2000, с. 67].

Значения ФМ показывают, что образцы Mk2/2-1 и Mk2/2-16 относятся к гипо- и нормофемическим сиаллитам, Mk2/2-6, Mk2/2-13, Mk2/2-17-2 и Mk2/2-WN(2) – к гипофемическим, а Mk2/4-3, Mk2/2-9, Mk2/2-10, Mk2/2-14, Mk2/2-17 и Mk2/2-WN – к нормофемическим силитам [Там же, с. 71].

По значениям ТМ верхнеленская группа не показывает такой сильной дифференциации, как бельская, так как почти все силиты укладываются в показатели, определенные для гипо- и нормотитанистых градаций, кроме образца Mk2/4-3, который относится к супертитанистым. Сиаллитовые образцы Mk2/2-1 и Mk2/2-16 могут быть отнесены к категории нормотитанистых [Там же, с. 82].

Показатели по КМ указывают, что в 7 образцах могут содержаться гидрослюды, хлорит и, возможно, плагиоклаз, еще в четырех случаях – Mk2/4-3, Mk2/2-13 и Mk2/2-17-2, Mk2/2-WN(2) – гидрослюды и ортоклаз [Интерпретация геохимических ... , 2001, с. 106]. В образце Mk2/2-6 содержание К оказалось ниже предела обнаружения.

По модулю ЖМ образцы силитов определяются в основном как гипо- (Mk2/2-13, Mk2/2-17, Mk2/2-17-2 и Mk2/2-WN(2)) и норможелезистые (Mk2/4-3, Mk2/2-9, Mk2/2-10, Mk2/2-14 и Mk2/2-WN). И лишь один (Mk2/2-6) относится к супержелезистым. Сиаллитовые образцы Mk2/2-1 и Mk2/2-16 определены как норможелезистые [Там же, с. 103].

Как видно из геохимического анализа, сырье, использованное для артефактов верхнеленской группы, довольно разнообразно. Содержание SiO₂ в образцах различно и составляет от 43 до 79 масс. %. При этом по данным модуля ГМ большая их часть относится к хемотипу силитов (гипо- и нормофемических, гипо-

Таблица 3

Макарово 2. Содержание основных петрогенных оксидов (масс. %) в каменных артефактах
(группировка по убыванию содержания SiO₂)

Table 3

Makarovo 2. Content of main petrogenic oxides (wt. %) in stone artifacts and rock pieces
(grouping by descending SiO₂ content)

Шифр образца	Находка	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃ (Σ)*	ZnO	LE и пр.**	Всего
Mk2/2-6	Нуклеус	<***	0,240	79,020	0,018	0,058	<	0,171	<	0,008	0,199	0,002	20,284	100
Mk2/2-17	Нуклеус	<	8,511	72,364	0,042	0,085	4,203	0,231	0,132	0,006	0,193	0,004	14,228	100
Mk2/2-WN(2)	Нуклеус	<	6,926	66,844	0,048	0,204	3,582	0,388	0,120	0,011	0,184	0,014	21,679	100
Mk2/2-13	Преформа	<	7,153	62,903	0,018	0,121	3,537	0,262	0,078	0,011	0,218	0,002	25,696	100
Mk2/2-3	Нуклеус	<	8,565	60,947	<	<	2,798	0,287	0,860	0,055	2,571	0,007	23,911	100
Mk2/2-17	Нуклеус	<	10,527	59,456	0,023	<	2,049	0,395	0,175	0,031	1,809	0,007	25,528	100
Mk2/2-9	Нуклеус	<	8,957	57,565	0,021	0,021	1,684	0,437	0,342	0,045	1,976	0,009	28,944	100
Mk2/2-10	Преформа	<	9,742	53,699	<	<	2,186	0,491	0,476	0,064	2,491	0,015	30,836	100
Mk2/2-WN	Преформа	<	9,258	53,468	0,098	0,248	1,020	0,595	0,205	0,052	2,448	0,006	32,605	100
Mk2/2-16	Преформа	<	10,233	50,069	<	<	1,101	1,645	0,640	0,154	4,139	0,019	32,001	100
Mk2/2-14	Преформа	1,013	8,961	46,000	0,073	0,275	1,943	0,877	0,332	0,072	3,324	0,008	37,121	100
Mk2/2-1	Преформа	<	13,566	42,899	0,155	0,037	3,051	2,334	0,922	0,190	4,197	0,003	32,647	100

* Суммарное железо в пересчете на Fe₂O₃.

** Легкие (LE) и прочие элементы с незначительным содержанием, в том числе редкоземельные.

*** < – содержание элемента ниже предела обнаружения.

Таблица 4
Макарово 2. Значения петрохимических модулей
Table 4

Makarovo 2. Petrochemical module values

Шифр образца	Петрохимический модуль					
	ГМ	АМ	ФМ	ТМ	КМ	ЖМ
Mk2/2-6	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86
Mk2/2-17	0,12	0,12	0,00	0,02	0,49	0,02
Mk2/2-WN(2)	0,11	0,10	0,00	0,02	0,52	0,03
Mk2/2-13	0,12	0,11	0,00	0,01	0,49	0,03
Mk2/2-3	0,20	0,14	0,04	0,10	0,33	0,28
Mk2/2-17	0,21	0,18	0,03	0,02	0,19	0,17
Mk2/2-9	0,20	0,16	0,04	0,04	0,19	0,22
Mk2/2-10	0,24	0,18	0,05	0,05	0,22	0,25
Mk2/2-WN	0,22	0,17	0,05	0,02	0,11	0,26
Mk2/2-16	0,30	0,20	0,09	0,06	0,11	0,39
Mk2/2-14	0,28	0,19	0,10	0,04	0,22	0,37
Mk2/2-1	0,44	0,32	0,10	0,07	0,22	0,30

и норможелезистых, один – супержелезистый) и лишь два образца – к хемотипу сиаллитов (гипо- и нормофемических, норможелезистых). При этом, в отличие от бельской группы, по значениям ГМ и АМ обнаруживается достаточно сильная корреляция между отношениями содержания продуктов гидролиза к кремнезему и глинозему к кремнезему. Все силиты, кроме одного (Mk2/2-6), демонстрируют довольно высокое содержание глинозема и являются глинисто-кремнистыми и кремнисто-глинистыми сланцами. Два сиаллитовых образца (Mk2/2-1 и Mk2/2-16) литологически близки глинистым породам. По значениям КМ, как и в бельской группе, в большинстве образцов содержатся гидрослюды, хлорит (возможно, плагиоклаз), однако в четырех случаях можно предполагать присутствие ортоклаза.

Опираясь на данные модульных диаграмм ФМ-ГМ и АМ-ГМ (рис. 8), можно сделать вывод о положительной корреляции их значений в обоих случаях. На диаграммах рассеяния выделяется несколько кластеров, при этом первая демонстрирует довольно детальную дифференциацию². В первый кластер входят образцы Mk2/2-13, Mk2/2-17-2 и Mk2/2-WN(2) с низкими показателями ФМ и незначительными значениями ГМ. К нему тяготеет образец Mk2/2-6 с более низкими значениями ГМ. Второй, довольно плотный кластер составляют образцы Mk2/4-3, Mk2/2-9, Mk2/2-10, Mk2/2-17 и Mk2/2-WN со средними для верхнеленской коллекции значениями. К третьему относятся два образца Mk2/2-14 и Mk2/2-16 с довольно высокими значениями по обоим модулям, а на некотором удалении от них располагается образец Mk2/2-1 с еще более высокими показателями. Диаграмма рассеяния АМ-ГМ рисует похожую картину с той лишь разницей, что первый и третий кластер располагаются ближе ко второму. Образцы Mk2/2-6 и Mk2/2-1 также занимают разнополюсные позиции.

² В данном случае, в отличие от бельской группы, диаграмма ФМ-ГМ достаточно информативна ввиду отсутствия бессистемной дисперсии величины суммарного железа.

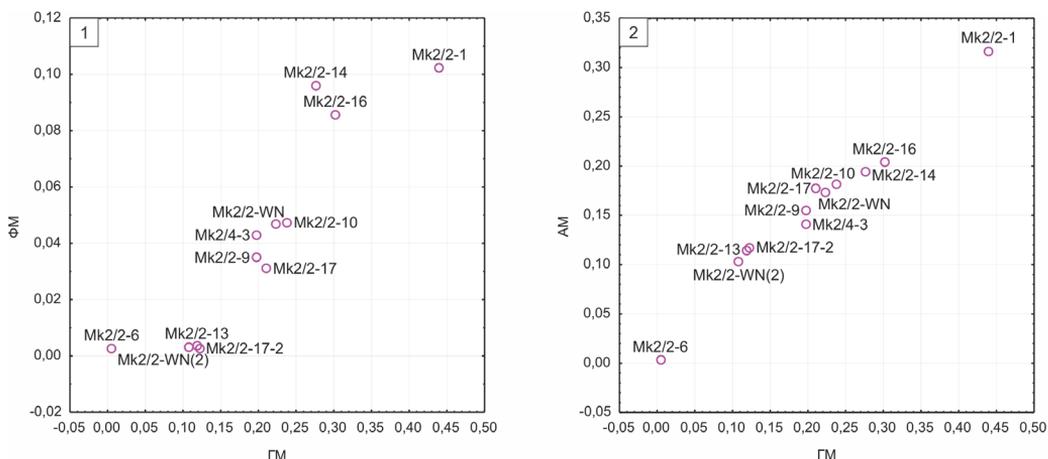


Рис. 8. Верхнеленская группа кремнистых пород, модульные диаграммы: 1 – ФМ-ГМ; 2 – АМ-ГМ

Fig. 8. Upper Lena group of siliceous rocks, modular plots: 1 – FM-GM; 2 – AM-GM

ПРФА: корреляция данных и вопросы происхождения сырья

Сравнительный анализ бельской и верхнеленской групп кремнистых пород выполнен по трем параметрам, среди которых на первом месте модульные диаграммы ФМ-ГМ и АМ-ГМ (рис. 9, 1а, 1б, 2а, 2б). Кроме того, мы использовали опыт зарубежных специалистов, которые для дифференциации кремнистых пород из разных регионов Европы успешно применяют диаграмму отношения CaO (в масс. %) к суммарному железу (в ppm) [Högberg, Olausson, Hughes, 2012; Högberg, Hughes, Olausson, 2016; Erratic Flint ... , 2016], являющуюся вариацией кальциевого модуля³ (далее – КЦМ). Однако было принято решение ее немного скорректировать и, используя значения массового процента, добавить к железу, пересчитанному на Fe₂O₃, показатели по Al₂O₃, учитывая довольно существенное содержание глинозема во многих образцах, особенно верхнеленской группы (рис. 9, 3а, 3б).

В результате мы получили три варианта положительной корреляции данных для исследуемых коллекций: по ФМ-ГМ – простую слабую, по АМ-ГМ – простую сильную (близкую к линейной), по КЦМ – сложную (по экспоненте) и относительно сильную. При этом каждая из диаграмм имеет свои преимущества: если АМ-ГМ демонстрирует наиболее близкий к линейному тренд корреляции, то ФМ-ГМ и КЦМ позволяют провести более детальный кластерный анализ и подробнее обсудить дифференциацию пород.

На диаграммах ФМ-ГМ и АМ-ГМ хорошо видно, что большинство образцов бельской группы, включая куски породы с Соснового Бора, которые относятся к преимущественно гипоглиноземистым гипер- и суперсилитам (силицитам), сосредоточено в одном кластере. Это явно указывает на однородность сырья, использованного для изготовления данных артефактов. Происхождение его следует

³ В практике современной российской литохимии нет четко определенного понятия «кальциевый модуль», при этом содержание CaO используется для решения разных задач в соотношении с такими оксидами, как SiO₂ [Повышение показателей ... , 2015] и P₂O₅ [Разработка и совершенствование ... , 2017; Юдович, Кетрис, Рыбина, 2020, с. 4].

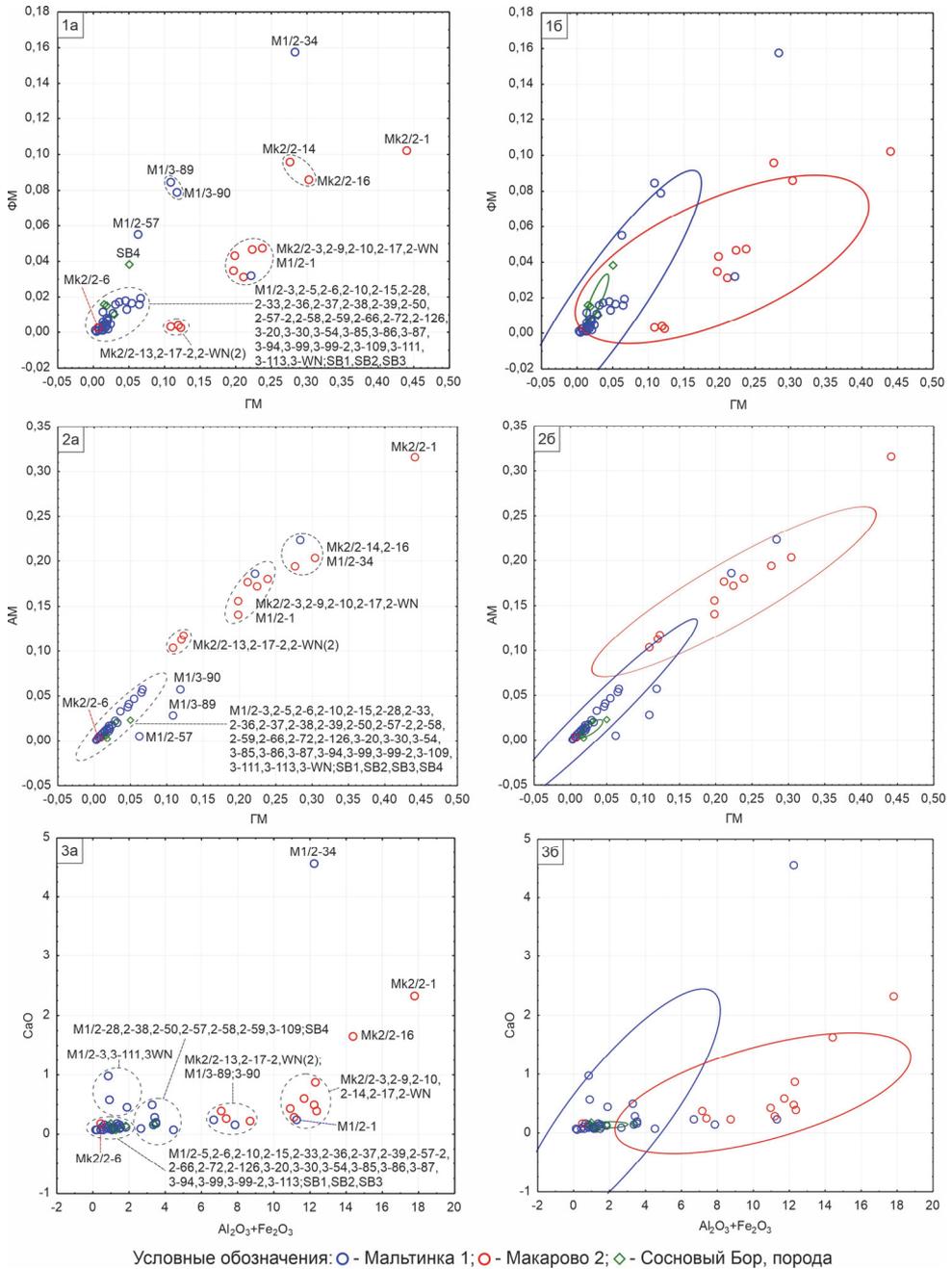


Рис. 9. Результаты корреляции данных по бельской и верхлененской группам кремнистых пород: 1 – модульная диаграмма ФМ-ГМ (а – с номерами образцов и кластерами, б – с эллипсами рассеяния); 2 – модульная диаграмма АМ-ГМ (а – с номерами образцов и кластерами, б – с эллипсами рассеяния); 3 – диаграмма КЦМ, масс. % (а – с номерами образцов и кластерами, б – с эллипсами рассеяния)

Fig. 9. Results of correlation of data on the Belaya and Upper Lena groups of siliceous rocks: 1 – FM-GM modular plot (a – with sample numbers and clusters, b – with scattering ellipses); 2 – AM-GM modular plot (a – with sample numbers and clusters, b – with scattering ellipses); 3 – CM plot (a – with sample numbers and clusters, b – with scattering ellipses)

связывать с отложениями ангарской свиты нижнего кембрия, представленной преимущественно доломитами и известняками, в верхней половине которой часто фиксируется окремнение в виде гнезд, прослоев и линз [Геологическая карта ... , 1961, с. 15]. Выходы ее на поверхность имеются на многих участках берегов р. Белой, от с. Бельск до устья, в том числе в районе таких известных археологических объектов, как Усть-Белая, Сосновый Бор, Мальта, Холмушино (ансамбль памятников) и др. То есть охотники-собиратели в долине р. Белой на протяжении всего времени освоения данного участка, наиболее интенсивная фаза которого началась в верхнем палеолите, были обеспечены относительно качественным сырьем для производства каменных орудий, происходящим из довольно древних отложений.

Несколько образцов с Мальтинки 1 и один образец породы с Соснового Бора несколько отличаются по химическому составу, причем, если говорить о предметах под шифром М1/3-89, М1/3-90 (один кусок породы?), М1/2-57 и SB4, то главным обстоятельством в данном случае является повышенное содержание суммарного железа, что не обязательно означает иное происхождение сырья. Дело в том, что на некоторых из этих образцов присутствуют видные невооруженным взглядом пятна ожелезнения, причем на отдельности породы с Соснового Бора сильно ожелезнен только поверхностный слой конкреции, на что указывает в том числе разный уровень Fe по результатам измерений этого куска с нескольких сторон. Таким образом, при изучении кремнистых пород ангарской свиты в долине р. Белой следует учитывать наличие данного фактора, показатели которого могут варьировать в зависимости от степени поверхностного ожелезнения конкреций, и выбирать на артефактах для измерений участки без видимых следов ожелезнения, а на отдельностях породы – участки ближе к сердцевине.

Особыми характеристиками по всем параметрам обладают образцы М1/2-1 и М1/2-34. Первый относится к нормоглиноземистым миоциллитам и входит в границы одного из кластеров верхнеленской группы, однако по окраске и текстуре имеет явные отличия. Повышенное содержание Mg во втором образце позволило определить его как нормоглиноземистый псевдосилит (близкий к глинистой породе), и это единственный подобный образец в выборке, который практически по всем показателям занимает особую позицию. Особенно четко это выражено на диаграммах ФМ-ГМ и КЦМ. Высокое содержание CaO и Mg позволяет выдвинуть предположение, что сырьем в данном случае выступила окремнелая доломитовая порода с повышенной долей глинозема, что, в свою очередь, не исключает его местного (бельского) происхождения.

Верхнеленская группа, состоящая в основном из глинисто-кремнистых и кремнисто-глинистых пород, довольно сильно отличается по химическому составу от бельской, но здесь мы видим свои вариации. В первую очередь хочется обратить внимание на кластер, который расположен ближе всего к бельским материалам. Он включает образцы Mk2/2-13, Mk2/2-17-2 и Mk2/2-WN(2), являющиеся нормоглиноземистыми нормосилитами (слабоглинистыми силицитами). Судя по тому, как они хорошо группируются, и учитывая их одинаковую структуру, текстуру и окраску, можно сделать вывод об изготовлении данных артефактов из одного куска породы. Тем не менее вряд ли они связаны своим происхождением с бельскими выходами ангарской свиты, так как содержат большую долю глинозема.

Другой кластер, более крупный (по диаграммам ФМ-ГМ и АМ-ГМ), составляют преимущественно нормоглиноземистые миосилиты (глинистые силициты) под шифрами Мк2/2-3, Мк2/2-9, Мк2/2-10, Мк2/2-17, Мк2/2-WN, и расположение кластера наглядно демонстрирует существенные его отличия от бельской группы. Отдельно группируются еще два образца (Мк2/2-14 и Мк2/2-16) с повышенными значениями модулей. Причем если первый, нормоглиноземистый миосилит, тяготеет по некоторым параметрам, в том числе по диаграмме КЦМ, к предыдущему кластеру, то второй определен как нормоглиноземистый нормосиллит (глинистая порода) с довольно высокими показателями как для Са, так и для $Fe_2O_3 + Al_2O_3$, а это, в свою очередь, сближает его с образцом Мк2/2-1, занимающим отдельную позицию и имеющим наиболее высокие значения по всем модулям.

Совершенно неожиданным результатом оказалось то, что образец Мк2/2-6 попал в основной бельский кластер. Причем он близок к бельским гиперсилицитам не только по химическому составу, но и по цвету и структуре. Однозначной оценки этому мы пока дать не можем, так как здесь может быть не один вариант интерпретации. С одной стороны, крайне заманчиво объявить об интрузивном характере данного предмета (в целом по отношению к материалам Макарово 2) и что этот факт свидетельствует об импорте сырья с долины р. Белой на Верхнюю Лену (расстояние по прямой – около 200 км). С другой стороны, кажется преждевременным превращать это в утверждение, так как, во-первых, верхнеленская выборка пока невелика, а во-вторых, не совсем понятно, насколько сходны или различны литохимические характеристики силицитов ангарской свиты, проявления которой есть в разных районах (в том числе в верховьях р. Лены, в предгорьях Приморского хребта, но значительно выше по течению от Макарово 2) [Государственная геологическая карта ... , 2009], и позволяет ли методика, выбранная нами, четко их дифференцировать. Для решения данного вопроса требуется расширение количества и разнообразия выборок по материалам раскопок и кремнистых пород, связанных своим генезисом с отложениями нижнего кембрия.

Происхождение сырья, из которого изготавливались артефакты верхнеленской серии, вопрос довольно сложный, но в первую очередь следует обратить внимание на тот факт, что многие из них выполнены на мелких гальках. Как рабочую гипотезу можно выдвинуть версию, что источником в данном случае служили галечные горизонты манзурского аллювия, проявления которого зафиксированы в районе, где расположено местонахождение Макарово 2 [Литогеохимические и палинологические ... 2022, рис. 1]. В частности, хорошо изучен кистеневский разрез [Уфимцев, Щетников, Филинов, 2010] манзурского аллювия, расположенный буквально в 3 км ниже по течению р. Лены. Состав его галечников разнообразен и включает, наряду с прочими, и кремнистые породы различного происхождения [Логачев, Ломоносова, Климанова, 1964, с. 103], что не противоречит дифференциации, зафиксированной по результатам нашего анализа.

Анализ трехмерных моделей

В первую очередь в программе AGMT3-D произведены единообразное позиционирование трехмерных моделей нуклеусов и преформ к. г. 2 Мальтинки 1 и снятие координат меток. На следующем этапе с поверхности каждого артефакта снимались точки в пределах координатной сетки размером 50×50, что в совокупности позволило получить 5 тыс. координат для каждой модели артефакта,

преобразованной в формат .3dl. Затем произведено автоматическое соотношение координат различных артефактов между собой.

Поскольку целью исследования являлись апробация трехмерного геометрико-морфометрического анализа и оценка возможностей программы AGMT3-D как исследовательского инструмента, из всего спектра возможных операций выбраны те, которые наиболее наглядно демонстрировали вариабельность морфологии нуклеусов и их преформ в рассматриваемой выборке. Для этого модели артефактов были разбиты на две группы в соответствии с их функцией. Первым инструментом, позволяющим сделать выводы относительно морфологической вариабельности рассматриваемых артефактов, является расположение совокупности двух выделенных групп на графике (PCA Display) (рис. 10). Артефакты распределены на графике в соответствии со значениями двух главных компонент (PCA), объясняющих совокупно 60,91 % вариабельности. Первая компонента (42,3 % вариабельности) связана с изменением формы контрфронта от простого бифасиального оформления (M1/2-39) до вариации с выемкой (M1/2-5). Вторая компонента (18,61 % вариабельности) покрывает изменения морфологии, по всей видимости связанные с ударной площадкой и углами ее наклона от грубо оббитой преформы со скошенной площадкой (M1/2-41) до клиновидного нуклеуса с вогнутой скошенной площадкой, образованной снятием с правой латерали скола, деформировавшего проксимальную зону негативов пластинчатых снятий (M1/2-57-1). Анализ данного графика позволяет говорить о значительной близости двух групп, что подтверждает предварительные типологические определения, предполагающие отнесение преформ и клиновидных нуклеусов к одной редуccionной модели.

Для верификации полученных результатов использован другой инструмент – Significance Tester, не выявивший значительной вариабельности между группами по ряду параметров (вариабельность формы, объема и площади, отклонение от идеальной трехмерной билатеральной симметрии и бифасиальной симметрии).

Еще один использованный нами инструмент (Compare Group Means) демонстрирует сходства и различия между усредненными формами моделей нуклеусов и преформ (рис. 11). С одной стороны, анализ изображений позволяет говорить о морфологической близости рассматриваемых групп, что объясняется использованием единого типа заготовки. С другой стороны, наглядно видны различия между усредненными формами нуклеусов и преформ, которые отображают технологически значимые элементы.

Во-первых, можно сказать, что морфология преформ менее стандартизирована в сравнении с нуклеусами. При этом наблюдается различие угла левого края продемонстрированных сечений, которое объясняется организацией на данном терминале заготовки фронта нуклеуса. В данном аспекте свое отражение на усредненной модели находит и тенденция наклона зоны скалывания к правой латерали, отмеченная для трех нуклеусов.

Во-вторых, благодаря тому, что на графиках усредненных форм участки, на которых наблюдается наибольшая вариабельность, выделены цветовым спектром от желтого к красному, можно сделать вывод, что наибольшая внутригрупповая вариабельность для нуклеусов наблюдается для зоны контрфронта, для преформ – ударной площадки и контрфронта. Наименее вариабельные участки выделены темно-синим цветом – это плоскости латералей. Для межгрупповой вариабельности наиболее показательным участком служит участок заготовки, где оформлялся фронт нуклеуса.

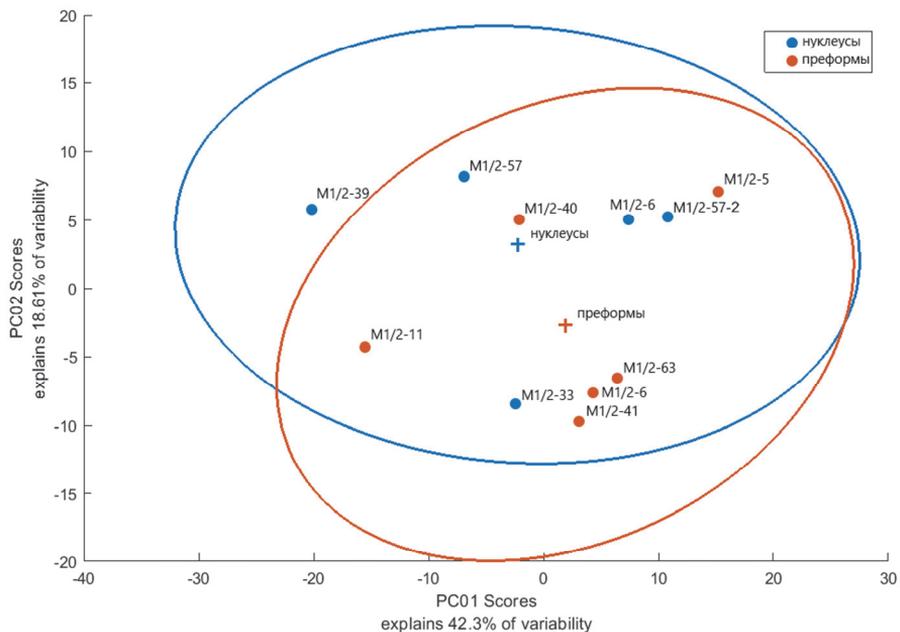


Рис. 10. Мальтинка 1, к. г. 2. Диаграмма рассеяния с распределением моделей артефактов в соответствии со значениями двух главных компонент вариальности форм (AGMT3-D)
Fig. 10. Maltinka 1, layer 2. Scatter plot with the distribution of artifact models in accordance with the values of the two main components of shape variability (AGMT3-D)

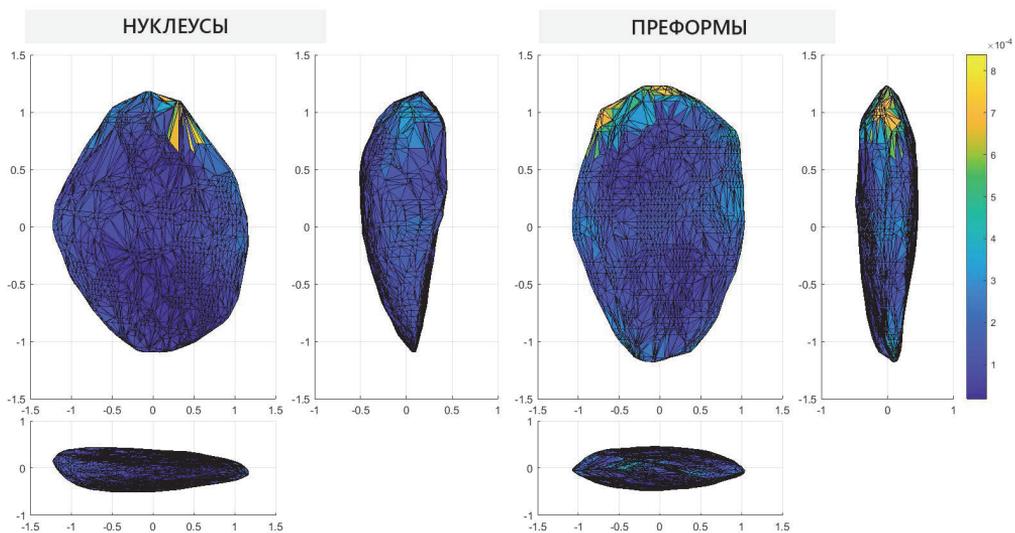


Рис. 11. Мальтинка 1, к. г. 2. Усредненные формы артефактов с отмеченными межгрупповыми различиями (AGMT3-D)
Fig. 11. Maltinka 1, layer 2. Averaged shapes of artifacts with marked intergroup differences (AGMT3-D)

Таким образом, использованные в программе AGMT3-D инструменты позволяют говорить о значительной близости двух рассмотренных категорий артефактов Мальтинки 1 – нуклеусов и преформ.

Обсуждение

Методы неразрушающего анализа каменных артефактов, использованные нами в настоящем исследовании, продемонстрировали довольно высокую эффективность. В результате рентгенофлуоресцентного анализа, проведенного портативным прибором при помощи специального ПО и обработки значений основных петрохимических модулей (ГМ, ФМ и АМ, а также вариации кальциевого модуля), удалось выявить особенности сырья, использованного древними охотниками-собираателями для производства заготовок и орудий в двух районах Байкало-Енисейской Сибири – в долине р. Белой и на Верхней Лене. Проанализированные кремнистые породы можно разделить на несколько кластеров в соответствии с композицией их химического состава.

Породы бельской группы, несмотря на вариации доли SiO_2 , в большинстве своем представляют собой кремнистые и (в отдельных случаях) глинисто-кремнистые сланцы, происхождение которых очевидно связано с отложениями ангарской свиты нижнего кембрия. Возможно, это сырье собиралось охотниками-собираателями на участке правого берега р. Белой в районе местонахождения Сосновый Бор. Один образец породы, из которой изготовлен небольшой скребок, является, вероятно, окремнелым доломитом, который также может происходить из отложений ангарской свиты.

Образцы из верхнеленской группы по ряду параметров существенно отличаются от бельских пород в первую очередь повышенным содержанием глинозема, что позволяет отнести их к глинисто-кремнистым и кремнисто-глинистым сланцам, а в двух случаях даже к глинистыми породам, хотя структуру многих из них можно охарактеризовать как стекловатую. С другой стороны, они обнаруживают и значительную внутригрупповую вариабельность, что может объясняться «пестрым» составом галечников манзурского аллювия, с которым мы связываем происхождение данного сырья. При этом один образец (клиновидный микро-нуклеус) по всем характеристикам соответствует породам бельской группы, что может указывать на импортный его характер. Однако данная гипотеза настоятельно требует проверки путем расширения выборки по сартанским археологическим объектам Верхней Лены и анализа кремнистых пород с разных участков ангарской свиты.

Можно сделать вывод, что ПРФА и выбранная нами методика анализа первичных данных имеют широкие перспективы для выявления источников сырья, местных и неместных компонентов в составе археологических коллекций определенных местонахождений. Не совсем понятно пока, позволит ли анализ отдельных химических элементов с незначительным содержанием, в том числе редкоземельных, провести более детальную дифференциацию на локальном уровне. Это можно проверить только опытным путем.

При всех своих достоинствах ПРФА имеет и ряд ограничений. В частности, нет возможности определить содержание Na_2O , который выступает важным параметром для аналитических исследований осадочных пород. Кроме того, для получения более корректных данных необходима калибровка портативного

прибора путем сравнения с результатами измерения одних и тех же образцов на стационарных приборах при соответствующей пробоподготовке и введения поправочных коэффициентов. Многие проблемы также можно будет решить посредством расширения аналитической выборки как по археологическим коллекциям, так и по источникам сырья, и привлечения других методов изучения горных пород, в первую очередь петрографического анализа.

Использование геометрико-морфометрического анализа применительно к терминально-краевым нуклеусам и их преформам, с условием, если заготовками выступали бифасы, также демонстрирует определенные перспективы. К его достоинствам можно отнести сведение к минимуму влияния субъективного фактора в определении вариабельности морфологии изделий, возможность применения большого набора статистических методов для обработки моделей и сравнения морфологии как отдельных артефактов, так и их совокупностей с разных местонахождений. Использованное программное обеспечение (AGMT3-D) позволяет произвести все необходимые операции и представить результат в виде наглядных диаграмм и рисунков. К недостаткам метода можно отнести довольно существенные временные ресурсы, затрачиваемые на определенных этапах работы. Тем не менее геометрико-морфометрический анализ в отношении терминально-краевых нуклеусов эффективнее использовать в совокупности с другими методами анализа трехмерных моделей, в частности для определения угла между площадкой и фронтом и соотношения различных метрических параметров изделий и негативов сколов.

Заключение

Настоящее исследование является первым в своем роде опытом использования ПРФА и анализа трехмерных моделей в практике археологических исследований Байкало-Енисейской Сибири. Полученные данные, несмотря на их предварительный характер, позволяют надеяться, что дальнейшее уточнение методики и расширение выборки приведут к получению довольно значимых результатов, которые станут существенным вкладом в изучение адаптации и миграций сообществ палеолитических охотников-собираателей.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-28-01527) «Особенности микропластинчатых технологий сартанского периода Байкало-Енисейской Сибири и их место в верхнем палеолите Северной Азии».

Список литературы

- Аксенов М. П. Палеолит и мезолит Верхней Лены. Иркутск : Изд-во Иркут. гос. техн. ун-та, 2009. 368 с.
- Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Восточно-Саянская. Лист N-48-XXVI. Объяснительная записка. М. : Госгеолтехиздат, 1961. 84 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-48 – Иркутск. Объяснительная записка. СПб. : Картофабрика ВСЕГЕИ. 2009. 574 с.
- Интерпретация геохимических данных: учеб. пособие / ред. Б. В. Скляров. М. : Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.
- Использование трехмерных моделей в ходе морфометрического анализа нуклеусов стоянки Обишир-5 (Ферганская долина, Кыргызстан) / Г. И. Марковский, С. Алишер кызы, А. Абдыканова, С. В. Шнайдер // Проблемы археологии, этнографии, антропологии Сибири и сопредельных территорий. 2022. Т. 28. С. 169–174. <https://doi.org/10.17746/2658-6193.2022.28.0169-0174>
- Логачев Н. А., Ломоносова Т. К., Климанова В. М. Кайнозойские отложения Иркутского амфитеатра. М. : Наука, 1964. 195 с.

- Леженко И. Л. Новые сведения по палеолиту реки Белой // Археология и этнография Восточной Сибири. Иркутск : Иркут. ун-т, 1978. С. 9–11.
- Леженко И. Л. Полевые исследования Бельского палеолитического отряда // Исследования памятников древних культур Сибири и Дальнего Востока. Новосибирск, 1987. С. 131–132.
- Литогеохимические и палинологические показатели палеоклимата раннего плейстоцена в озерных отложениях из разреза манзурского аллювия (Предбайкалье) / С. В. Рассказов, А. Аль Хамуд, А. Хассан, Н. В. Кулагина, И. С. Чувашова, Т. А. Ясныгина, Р. Ц. Будаев // Геология и окружающая среда. 2022. Т. 1, № 2. С. 43–81.
- Повышение показателей производства глинозема за счет рудоподготовки нефелина и известняка / А. В. Конев, Л. Н. Кузина, К. А. Шульгина, С. Ф. Богдановская, Ж. В. Миронова // Сборник докладов седьмого международного конгресса «Цветные металлы и минералы». Красноярск, 2015. С. 185–193.
- Применение трехмерного геометрико-морфометрического анализа для изучения артефактов каменного века / А. В. Шалагина, К. А. Колобова, П. В. Чистяков, А. И. Кривошапкин // Stratum plus. 2020. № 1. С. 343–358.
- Разработка и совершенствование технологии получения НРСа удобрения из фосфоритов Центральных Кызылкумов / Д. Ш. Шеркузиев, Х. М. Каноатов, М. Х. Дадамирзаев, Д. А. Сарibaева, Ё. Г. Ёкубжанова // Техника. Технологии. Инженерия. 2017. № 2 (4). С. 101–106.
- Средний и поздний этапы верхнего палеолита Байкало-Енисейской Сибири: хронология и общая характеристика / Н. Е. Бердникова, И. М. Бердников, Г. А. Воробьева, Е. А. Липнина // Известия Иркутского государственного университета. Серия Геоархеология. Этнология. Антропология. 2021. Т. 38. С. 59–77. <https://doi.org/10.26516/2227-2380.2021.38.59>
- Уфимцев Г. Ф., Щетников А. А., Филинов И. А. Последний эрозионный врез в речных долинах юга Восточной Сибири // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 9. С. 815–819.
- Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб. : Наука, 2000. 479 с.
- Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Рыбина Н. В. Геохимия титана. Сыктывкар : ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 432 с.
- Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Рыбина Н. В. Геохимия фосфора. Сыктывкар : ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2020. 512 с.
- Erratic Flint from Poland: Preliminary results of petrographic and geochemical analyses / I. Sobkowiak-Tabaka, D. H. Werra, R. E. Hughes, R. Siuda // Archaeologia Polona. 2016. Vol. 54. P. 67–82.
- Geochemical source evaluation of archaeological chert from the Carson mounds site in northwestern Mississippi using portable X-ray fluorescence (pXRF) / J. M. Mehta, G. McCall, T. Marks, J. Enloe // Journal of Archaeological Science: Reports. 2017. Vol. 11. P. 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.12.014>
- Handheld XRF for Art and Archaeology / ed. by A. N. Shugar, J. L. Mass. Leuven University Press, 2012. Vol. 3. P. 473.
- Herzlinger G., Grosman L. AGMT3-D: A software for 3-D landmarks-based geometric morphometric shape analysis of archaeological artifacts // PLoS ONE. 2018. Vol. 13, Is. 11. e0207890. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207890>
- Högberg A., Olausson D., Hughes R. Many Different Types of Scandinavian Flint – Visual Classification and Energy Dispersive X-ray Fluorescence // Fornvännen. 2012. Vol. 107. P. 225–240.
- Högberg A., Hughes R., Olausson D. Chemical and visual analysis of flint from Gotland and Öland // Fornvännen. 2016. Vol. 111. P. 145–152.
- Menne J., Holzheid A., Heilmann C. Multi-Scale Measurements of Neolithic Ceramics—A Methodological Comparison of Portable Energy-Dispersive XRF, Wavelength-Dispersive XRF, and Microcomputer Tomography // Minerals. 2020. Vol. 10, Is. 10. 931. <https://doi.org/10.3390/min10100931>
- Soil Formation, Subaerial Sedimentation Processes and Ancient Cultures during MIS 2 and the Deglaciation Phase MIS 1 in the Baikal–Yenisei Siberia (Russia) / G. Vorobieva, N. Vashukevich, N. Berdnikova, I. Berdnikov, D. Zolotarev, S. Kuklina, E. Lipnina // Geosciences. 2021. Vol. 11, Is. 323. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080323>
- Tykot R. H., Martin F. F. Analysis by pXRF of Prehistoric Obsidian Artifacts From Several Sites on Ustica (Italy): Long-Distance Open-Water Distribution From Multiple Island Sources During the Neolithic and Bronze Ages // Open Archaeology. 2020. Vol. 6, N 1. P. 348–392. <https://doi.org/10.1515/opar-2020-0118>
- Valletta F., Dag I., Grosman L. Identifying Local Learning Communities During the Terminal Palaeolithic in the Southern Levant: Multi-scale 3-D Analysis of Flint Cores // Journal of Computer Applications in Archaeology. 2021. Vol. 4, Is. 1. P. 145–168. <https://doi.org/10.5334/jcaa.74>
- Wyatt-Spratt S. After the Revolution: A Review of 3D Modelling as a Tool for Stone Artefact Analysis // Journal of Computer Applications in Archaeology. 2022. Vol. 5, Is. 1. P. 215–237. <https://doi.org/10.5334/jcaa.103>
- X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology / ed. by M. S. Shackley. New-York : Springer New York, 2011. 231 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6886-9>

References

- Aksenov M. P. *Paleolit i mezolit Verkhnei Leny [Paleolithic and Mesolithic of the Upper Lena]*. Irkutsk, ISTU Publ., 2009, 368 p. (In Russ.)
- Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200 000. Seriya Vostochno-Sayanskaya. List N-48-XXVI. Obyasnitelnaya zapiska [Geological map of the USSR, scale 1:200,000. East Sayan series. Sheet N-48-XXVI. Explanatory Note]*. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1961, 84 p. (In Russ.)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Masshtab 1:1 000 000 (tretie pokolenie). Seriya Angaro-Eniseiskaya. List N-48 – Irkutsk. Obiyasnitelnaya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Angara-Yenisei series. Sheet N-48 – Irkutsk. Ex-*

- planatory Note]. St. Petersburg, VSEGEI Card Factory, 2009, 574 p. (In Russ.)
- Sklyarov B. V. (Ed.). *Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh: ucheb. posobie [Interpretation of Geochemical Data: A Study Guide]*. Moscow, Internet Inzhiniring, 2001, 288 p. (In Russ.)
- Markovskii G. I., Alisher kyzy S., Abdykanova A., Shnaider S. V. Ispolzovanie trekhmernykh modelei v khode morfometricheskogo analiza nukleusov stoyanki Obishir-5 (Ferganskaya dolina, Kyrgyzstan) [Three-Dimensional Models in Morphometric Analysis of Cores from the Obishir-5 Site (Fergana Valley, Kyrgyzstan)]. *Problems of Archaeology, Ethnography, Anthropology of Siberia and Neighboring Territories*. 2022, Vol. 28, pp. 169–174. <https://doi.org/10.17746/2658-6193.2022.28.0169-0174> (In Russ.)
- Logachev N. A., Lomonosova T. K., Klimanova V. M. *Kainozoiskie otlozheniya Irkutskogo amfiteatra [Cenozoic deposits of the Irkutsk amphitheater]*. Moscow, Nauka Publ., 1964, 195 p. (In Russ.)
- Lezhnenko I. L. Novye svedeniya po paleolitu reki Beloi [New information on the Paleolithic of the Belaya River]. *Arkhologiya i etnografiya Vostochnoi Sibiri [Archaeology and ethnography of Eastern Siberia]*. Irkutsk, ISU Publ., 1978, pp. 9–11. (In Russ.)
- Lezhnenko I. L. Polevye issledovaniya Belskogo paleoliticheskogo otryada [Field research of the Belaya Paleolithic detachment]. *Issledovaniya pamyatnikov drevnikh kultur Sibiri i Dalnego Vostoka [Research of monuments of ancient cultures of Siberia and the Far East]*. Novosibirsk, 1987, pp. 131–132. (In Russ.)
- Rasskazov S. V., Khamud A. Al', Khassan A., Kulagina N. V., Chuvashova I. S., Yasnygina T. A., Budaev R. Ts. Litogeokhimicheskie i palinologicheskie pokazateli paleoklimata rannego pliotsena v ozernykh otlozheniyakh iz razreza manzurskogo allyuviya (Predbaikalie) [Lithochemical and palynological indicators of the early Pliocene paleoclimate in lacustrine sediments from a Manzurka alluvium section (Predbaikalie)]. *Geology and Environment*. 2022, Vol. 1, Is. 2, pp. 43–81. (In Russ.)
- Konev A. V., Kuzina L. N., Shulgina K. A., Bogdanovskaya S. F., Mironova Zh. V. Povyshenie pokazatelei proizvodstva glinozema za schet rudopodgotovki nefelina i izvestnyaka [Increased rates of production of alumina by nepheline ore preparation and limestone]. *Sbornik dokladov sedmogo mezhdunarodnogo kongressa "Tsvetnye metally i mineraly" [Collection of reports of the seventh international congress "Non-ferrous metals and minerals"]*. Krasnoyarsk, 2015, pp. 185–193. (In Russ.)
- Shalagina A. V., Kolobova K. A., Chistyakov P. V., Krivoshapkin A. I. Primeneniye trekhmernogo geometriko-morfometricheskogo analiza dlya izucheniya artefaktov kamennogo veka [Application of 3D Geometric-Morphometric Analysis to the Study of Stone Age Lithic Artifacts]. *Stratum plus*. 2020, Vol. 1, pp. 343–358. (In Russ.)
- Sherkuziev D. Sh., Kanoatov Kh. M., Dadamirzaev M. Kh., Saribaeva D. A., Ekubzhanova E. G. Razrabotka i sovershenstvovanie tekhnologii polucheniya NPCa udobreniya iz fosforitov Tsentralnykh Kyzylkumov [Development and improvement of technology for producing NPCa fertilizer from phosphorites of the Central Kyzylkum]. *Tekhnika. Tekhnologii. Inzheneriya [Technique. Technologies. Engineering]*. 2017, Vol. 2 (4), pp. 101–106. (In Russ.)
- Berdnikova N. E., Berdnikov I. M., Vorobieva G. A., Lipnina E. A. Middle and Late Stages of the Upper Paleolithic of Baikal-Yenisei Siberia: Chronology and General Characteristics. *Bulletin of the Irkutsk State University. Geoarchaeology, Ethnology, and Anthropology Series*. 2021, Vol. 38, pp. 59–77. <https://doi.org/10.26516/2227-2380.2021.38.59> (In Russ.)
- Ufimtsev G. F., Shchetnikov A. A., Filinov I. A. Poslednii erozionnyi vrez v rechnykh dolinakh yuga Vostochnoi Sibiri [The last erosional incision in the river valleys of the south of Eastern Siberia]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*. 2010, Vol. 51, Is. 9, pp. 815–819. (In Russ.)
- Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Osnovy litokhimii [Basics of lithochemistry]*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2000, 479 p. (In Russ.)
- Yudovich Ya. E., Ketris M. P., Rybina N. V. *Geokhimiya titana [Geochemistry of titanium]*. Syktyvkar, IG Komi SC UB RAS, 2018, 432 p. (In Russ.)
- Yudovich Ya. E., Ketris M. P., Rybina N. V. *Geokhimiya fosfora [Geochemistry of phosphorus]*. Syktyvkar, IG Komi SC UB RAS, 2020, 512 p. (In Russ.)
- Sobkowiak-Tabaka I., Werra D. H., Hughes R. E., Siuda R. Erratic Flint from Poland: Preliminary results of petrographic and geochemical analyses. *Archaeologia Polona*. 2016, Vol. 54, pp. 67–82.
- Mehta J. M., McCall G., Marks T., Enloe J. Geochemical source evaluation of archaeological chert from the Carson mounds site in northwestern Mississippi using portable X-ray fluorescence (pXRF). *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2017, Vol. 11, pp. 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.12.014>
- Shugar A. N., Mass J. L. (Eds.) *Handheld XRF for Art and Archaeology*. Leuven University Press, 2012, Vol. 3, 473 p.
- Herzlinger G., Grosman L. AGMT3-D: A software for 3-D landmarks-based geometric morphometric shape analysis of archaeological artifacts. *PLoS ONE*. 2018, Vol. 13, Is. 11, e0207890. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207890>
- Högberg A., Olausson D., Hughes R. Many Different Types of Scandinavian Flint – Visual Classification and Energy Dispersive X-ray Fluorescence. *Fornvännen*. 2012, Vol. 107, pp. 225–240.
- Högberg A., Hughes R., Olausson D. Chemical and visual analysis of flint from Gotland and Öland. *Fornvännen*. 2016, Vol. 111, pp. 145–152.
- Menne J., Holzheid A., Heilmann C. Multi-Scale Measurements of Neolithic Ceramics – A Methodological Comparison of Portable Energy-Dispersive XRF, Wavelength-Dispersive XRF, and Microcomputer Tomography. *Minerals*. 2020, Vol. 10, Is. 10, 931. <https://doi.org/10.3390/min10100931>
- Shugar A. N., Mass J. L. (Eds.) *Handheld XRF for Art and Archaeology*. Vol. 3. Leuven University Press, 2012, 480 p.
- Vorobieva G., Vashukevich N., Berdnikova N., Berdnikov I., Zolotarev D., Kuklina S., Lipnina E. Soil Formation, Subaerial Sedimentation Processes and Ancient Cultures during MIS 2 and the Deglaciation Phase MIS 1 in the Baikal-Yenisei Siberia (Russia).

- Geosciences*. 2021, Vol. 11, Is. 8. 323. <https://doi.org/10.3390/geosciences11080323>
- Tykot R. H., Martin F. F. Analysis by pXRF of Prehistoric Obsidian Artifacts from Several Sites on Ustica (Italy): Long-Distance Open-Water Distribution from Multiple Island Sources During the Neolithic and Bronze Ages. *Open Archaeology*. 2020, Vol. 6, Is. 1, pp. 348–392. <https://doi.org/10.1515/opar-2020-0118>
- Valletta F., Dag I., Grosman L. Identifying Local Learning Communities During the Terminal Palaeolithic in the Southern Levant: Multi-scale 3-D Analysis of Flint Cores. *Journal of Computer Applications in Archaeology*. 2021, Vol. 4, Is. 1, pp. 145–168. <https://doi.org/10.5334/jcaa.74>
- Wyatt-Spratt S. After the Revolution: A Review of 3D Modelling as a Tool for Stone Artefact Analysis. *Journal of Computer Applications in Archaeology*. 2022, Vol. 5, Is. 1, pp. 215–237. <https://doi.org/10.5334/jcaa.103>
- M. S. Shackley (Ed.). *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*. New-York, Springer New York, 2010, 231 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6886-9>

Сведения об авторах

Бердников Иван Михайлович

кандидат исторических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора по науке, НИЦ «Байкальский регион», Лаборатория геоархеологии Байкальской Сибири, Иркутский государственный университет; Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: yan-maiski@yandex.ru

Шегутов Иван Сергеевич

стажер-исследователь, НИЦ «Байкальский регион», Лаборатория геоархеологии Байкальской Сибири, Иркутский государственный университет; Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: shegutow@gmail.com

Золотарёв Дмитрий Павлович

инженер-исследователь, НИЦ «Байкальский регион», Лаборатория геоархеологии Байкальской Сибири, Иркутский государственный университет; Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: dmitryzolotarev2012@yandex.ru

Спасибко Александра Борисовна

стажер-исследователь, НИЦ «Байкальский регион», Лаборатория геоархеологии Байкальской Сибири, Иркутский государственный университет; Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: alekspb@yandex.ru

Бердникова Наталья Евгеньевна

старший научный сотрудник, НИЦ «Байкальский регион», Лаборатория геоархеологии Байкальской Сибири, Иркутский государственный университет; Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: nberd@yandex.ru

Information about the authors

Berdnikov Ivan Mikhailovich

Candidate of Sciences (History), Senior Researcher, Deputy Director for Science of Scientific Research Center “Baikal Region”, Laboratory of Geoarchaeology of Baikal Siberia, Irkutsk State University; 1, K. Marx st., Irkutsk, 664003, Russian Federation
e-mail: yan-maiski@yandex.ru

Shegutov Ivan Sergeevich

Trainee Researcher, Scientific Research Center “Baikal Region”, Laboratory of Geoarchaeology of Baikal Siberia, Irkutsk State University; 1, K. Marx st., Irkutsk, 664003, Russian Federation
e-mail: shegutow@gmail.com

Zolotarev Dmitrii Pavlovich

Research Engineer, Scientific Research Center “Baikal Region”, Laboratory of Geoarchaeology of Baikal Siberia, Irkutsk State University; 1, K. Marx st., Irkutsk, 664003, Russian Federation
e-mail: dmitryzolotarev2012@yandex.ru

Spasibko Alexandra Borisovna

Trainee Researcher, Scientific Research Center “Baikal Region”, Laboratory of Geoarchaeology of Baikal Siberia, Irkutsk State University; 1, K. Marx st., Irkutsk, 664003, Russian Federation
e-mail: alekspb@yandex.ru

Berdnikova Natalia Evgenievna

Senior Researcher, Scientific Research Center “Baikal region”, Laboratory of Geoarchaeology of Baikal Siberia, Irkutsk State University; 1, K. Marx st., Irkutsk, 664003, Russian Federation
e-mail: nberd@yandex.ru