

EDN: UYHLKQ

УДК 903.5:903.23–033.6:577.115.3(571.51)

Analysis of the Fatty Acid Composition of Pottery Vessels from the Burial Ground of Tesin Culture near Krasnoyarsk (Siberia, Russia)

**Anastasia K. Okrugina^a,
Anatoly N. Boyandin^b, Dmitry A. Vinogradov^a,
Pavel V. Mandryka^a and Denis Yu. Rogozin^{a, b*}**

*^aSiberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*^bInstitute of Biophysics SB RAS,
Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center SB RAS”
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 13.03.2024, received in revised form 20.03.2024, accepted 03.09.2024

Abstract. The study of the diet of ancient people is an integral part of the reconstruction of their lifestyle and living conditions in specific regions; it also provides important information about climate changes that influenced the transformation of economic activities of various ancient cultures. Some components of food products, such as fatty acids, are adsorbed into the walls of ceramic vessels used for cooking and can be helpful in detailing the diet of ancient people. Using gas chromatography, we identified the composition of fatty acids adsorbed into the walls of 13 pottery vessels found in a burial dated to the Tesin period of the Tagar culture of the early Iron Age, located on the outskirts of Krasnoyarsk (Siberia, Russia). The composition of fatty acids indicates that the vessels were used to prepare/store food products, which may have included meat and animal fat, milk, and plant products. In one of the vessels, total fatty acid content was higher, suggesting that it was more intensively used to prepare and store food. The samples collected from the inner walls and bottom parts of two vessels contained unsaturated fatty acids that were not identified in other samples: oleic, palmitol-oleic and 13-docosenoic fatty acids. Therefore, it can be assumed that those vessels were used for preparing or storing food products of plant origin.

Keywords: fatty acid, gas chromatography, Iron Age, Siberia, Tesin Culture, pottery vessel, lipid analysis.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: rogozin@ibp.ru

ORCID: 0009-0008-4132-8308 (Okrugina A.); 0000-0002-9190-2792 (Boyandin A.); 0000-0002-2882-4402 (Vinogradov D.); 0000-0002-8647-3823 (Mandryka P.); 0000-0002-9350-2936 (Rogozin D.)

Acknowledgements. The research was financially supported by the State Assignment of the Institute of Biophysics SB RAS, Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center SB RAS. The number of this research is FWES-2024–0024. This research is also part of the scientific program of the Laboratory of Archaeology of Yenisei Siberia at the Siberian State University. The authors are grateful to two anonymous reviewers for valuable comments and advice on improving the article.

Citation: Okrugina A. K., Boyandin A. N., Vinogradov D. A., Mandryka P. V., Rogozin D. Yu. Analysis of the fatty acid composition of pottery vessels from the burial ground of Tesin Culture near Krasnoyarsk (Siberia, Russia). *J. Sib. Fed. Univ. Biol.*, 2024, 17(4), 492–505. EDN: UYHLKQ



Анализ жирнокислотного состава керамических сосудов из погребения тесинской культуры в окрестностях г. Красноярска

**А. К. Округина^а, А. Н. Бояндин^б,
Д. А. Виноградов^а, П. В. Мандрыка^а, Д. Ю. Рогозин^{а, б}**

*^аСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

*^бИнститут биофизики СО РАН
Красноярский научный центр СО РАН
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. Изучение диеты древних людей является неотъемлемой частью реконструкции их образа жизни и условий проживания в конкретных регионах, а также предоставляет важные сведения об изменениях климата, которые влияли на трансформацию видов хозяйственной деятельности различных древних культур. Некоторые компоненты пищевых продуктов, такие как жирные кислоты, адсорбируются в стенки керамических сосудов, используемых для приготовления пищи, и могут применяться для детализации диеты древних людей. С помощью газовой хроматографии нами выявлен состав жирных кислот, адсорбированных в стенки 13 глиняных сосудов, найденных в захоронении тесинской культуры раннего железного века на территории г. Красноярска. Состав жирных кислот указывает на то, что в сосудах готовили/хранили продукты, в число которых возможно входило мясо и жир животных, молоко, а также продукты растительного происхождения. Один из сосудов отличался преобладающим общим содержанием жирных кислот, что позволяет предположить более интенсивное использование емкости в приготовлении и/или хранении пищи. На внутренних стенках и донных частях двух сосудов выявлены ненасыщенные кислоты, которые отсутствовали в прочих образцах: олеиновая, пальмито-олеиновая и эруковая. Следовательно, можно предполагать, что данные емкости использовались для приготовления или хранения продуктов растительного происхождения.

Ключевые слова: жирные кислоты, газовая хроматография, железный век, Сибирь, тесинская культура, керамические сосуды, анализ липидных остатков.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств Государственного задания Института биофизики СО РАН, обособленного подразделения ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН, номер темы FWES-2024–0024, а также научной программы Лаборатории археологии Енисейской Сибири ГИ СФУ. Авторы благодарны двум анонимным рецензентам за ценные замечания и советы по улучшению статьи.

Цитирование: Округина А.К. Анализ жирнокислотного состава керамических сосудов из погребения тесинской культуры в окрестностях г. Красноярска / А.К. Округина, А.Н. Бояндин, Д.А. Виноградов, П.В. Мандрыка, Д.Ю. Рогозин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2024. 17(4). С. 492–505. EDN: UYHLKQ

Введение

Керамические сосуды являлись неотъемлемой частью быта и хозяйства древних людей, они также использовались в погребальной практике. Фрагменты керамики являются одними из самых распространенных археологических находок, что свидетельствует о значительной роли этого материала в жизни и культуре древних цивилизаций (Roffet-Salque et al., 2017; Irto et al., 2022). Анализ древних остатков, извлеченных из керамики, помогает раскрыть информацию о рационе питания древних людей, способах обработки пищи, торговых связях, а также об особенностях ведения хозяйства и миграционных процессах среди народов прошлого (Regert, 2011).

В продуктах питания присутствуют липиды, которые могут оставаться на стенках керамических сосудов в виде обугленных или впитавшихся следов, таких как нагар. Процесс приготовления пищи приводит к адсорбции жирных кислот в стенках керамических сосудов, где они могут сохраняться на протяжении многих веков (Evershed et al., 1997). Исследования показывают, что жирные кислоты могут быть извлечены из очень старых образцов, возраст которых достигает 10–12 тысяч лет (Evershed et al., 1997). Однако у этого метода имеется существенный недостаток: поли-

ненасыщенные кислоты подвержены окислению, из-за чего со временем меняется состав жирных кислот. Именно они содержат множество пищевых маркеров, которые можно использовать для анализа рациона древнего человека. Изучение нагара на керамических сосудах осуществляется с использованием различных методов, включая анализ фитолитов, спор и пыльцы, а также изотопного состава (Кузьмин, 2017). В настоящее время также активно развиваются методы протеомного анализа (Wilkin et al., 2021).

Газовая хроматография в сочетании с масс-спектрометрией обладают высокой чувствительностью и способны обнаруживать и идентифицировать соединения в количестве от микрограмма (мкг) до нанogramма (нг). Это позволяет проводить качественную и количественную оценку липидных остатков (Мокрушин и др., 2020). Кроме того, анализ органических остатков может помочь в изучении взаимосвязи между формой и функцией сосудов, поскольку стиль сосудов часто ассоциируется с продуктами, для которых они изготовлены. Также форма и емкость сосуда тесно связаны с различными функциями для разных стилей керамики. Например, узкие кувшины с высоким горлышком, скорее всего,

использовались для хранения жидкостей и обращения с ними, в то время как более широкие горшки в форме чаши могли использоваться для приготовления твердой пищи (Roffet-Salque et al., 2017). Исследование этих особенностей помогает глубже понять историю и эволюцию изготовления посуды. Современные методы анализа органических остатков, значительно усовершенствованные в последние годы, позволяют проводить точные исследования и применять их в археологии (Van de Velde et al., 2019; Parakosta et al., 2019; Азаров, Пожиданов, 2020).

Целью настоящей работы является анализ и историческая интерпретация наличия и состава жирных кислот в образцах керамики раннего железного века, обнаруженных в склепе тесинского кургана на территории кладбища «Шинное» в г. Красноярске.

Материалы и методы

Объект исследования

Сосуды были найдены в ходе охранно-спасательных раскопок кургана на территории городского «Шинного» кладбища г. Красноярска в 2021–2022 гг. Курган располагался на правом берегу реки Енисей на высоком плато (рис. 1). В результате проведенных археологических работ установлено, что погребальный комплекс, из которого происходят рассматриваемые образцы посуды, соотносится с могильными сооружениями тесинской культуры (Кузьмин, 2011) и предварительно датируется авторами раскопок II–I вв. до н.э.

Для проведения исследования были выбраны 13 реставрируемых керамических сосудов разного размера и формы, найденных в числе сопроводительного инвентаря погребений основной могилы (склепа) (рис. 2). После извлечения из земли сосуды ничем не обраба-



Рис. 1. Карта с указанием места обнаружения керамических сосудов в кургане в окрестности кладбища «Шинное» г. Красноярска. Для создания карты был использован фрагмент космического снимка из Google Earth

Fig. 1. A map showing the sampling site where the pottery vessels were collected from the mound in the vicinity of the “Shinnoe” cemetery in Krasnoyarsk. A fragment of a satellite image from Google Earth was used to create the map

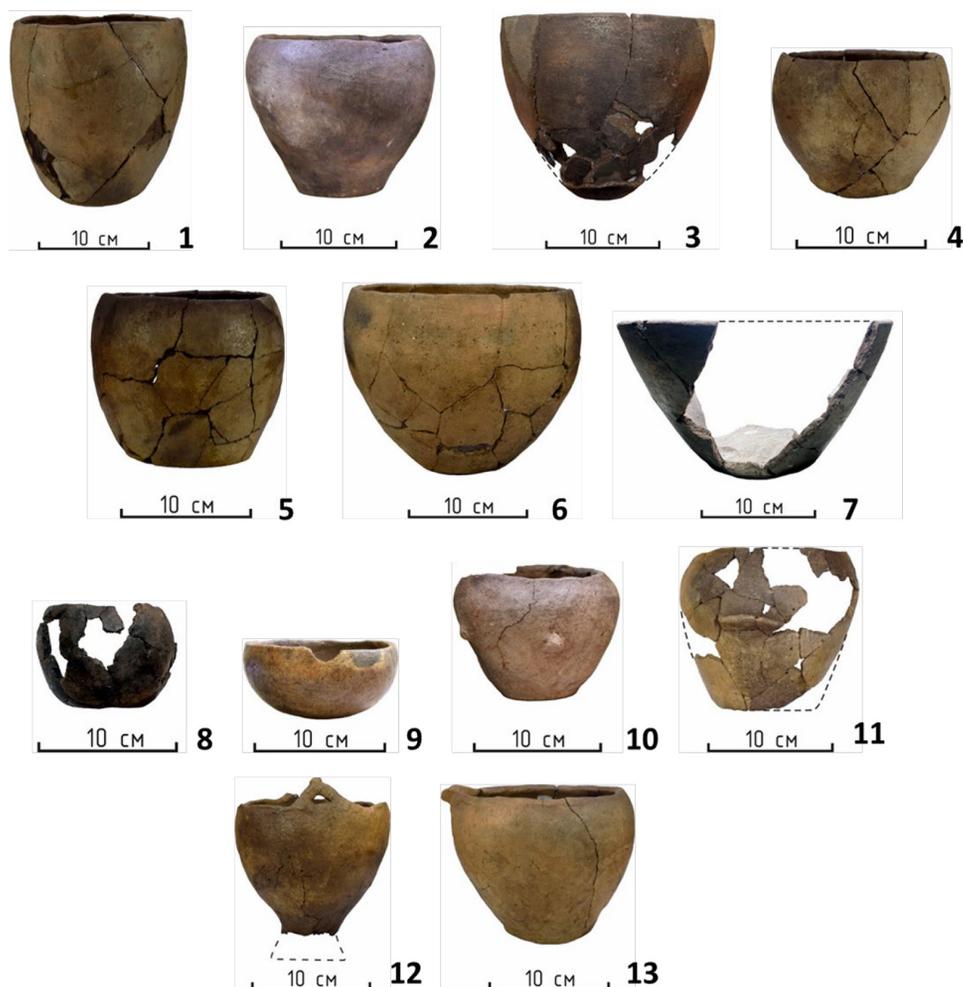


Рис. 2. Керамические сосуды, найденные на территории Шинного кладбища (г. Красноярск)

Fig. 2. Pottery vessels found at the “Shinnoe” cemetery (Krasnoyarsk)

тывались. В общей сложности было отобрано 42 образца от разных частей сосудов.

Из более чем 50 сосудов, найденных в захоронении, была проведена выборка, в соответствии с которой отобраны 11 сосудов, имевших баночную форму с плоским дном. Среди них есть сосуды: закрытой формы (№ 2), открытой формы (№ 7), боченковидной формы (№ 8), с сосцевидными налестками (№ 10), с боковыми ручками (№ 11), со сливом (№ 13). Помимо баночных сосудов с плоским дном представлены сосуд-плошка с округлым дном (№ 9) и котловидный с поддоном (№ 12).

На некоторых отобранных сосудах присутствуют следы нагара, что позволяет говорить об использовании сосудов для приготовления пищи, а также о возможности проведения анализа.

Отбор проб

Для анализа от каждого керамического сосуда были взяты образцы с трех точек: с внешней стенки емкости (образец I), с внутренней стенки в зоне нагара (образец II) и с дна с внутренней стороны (образец III) (рис. 3). Предположительно дно сосудов дол-



Рис. 3. Фрагменты керамического сосуда с участками отбора проб (видны темными полосами) на примере сосуда № 2

Fig. 3. Fragments of a pottery vessel with sampling sites (visible in dark stripes) using the example of vessel No. 2

ше всего контактировало с оставленной едой или напитком (Evershed et al., 2008). В сосудах № 2, № 10 и № 12 были проанализированы также образцы почвы из заполнения сосудов для оценки возможной контаминации с окружающей средой.

Для сбора порошка (около 20 мг) с поверхностей черепков использовали стальной бур. В каждом случае отдельно отбиралось по два образца: с поверхности и с более глубокого слоя. Пробы помещали в алюминиевую фольгу и доставляли в лабораторию.

В лаборатории к навескам 20 мг образцов добавляли внутренний стандарт (6-фенилгексановая кислота), по 1 мл метанола и 200 мкл концентрированной серной кислоты, после чего нагревали в закрытых флаконах при 70 °C в течение четырех часов. После окончания нагревания трижды экстрагировали метиловые эфиры жирных кислот порциями гексана по 4 мл. Гексановые экстракты объединяли и упаривали. Остатки растворяли

в 200 мкл гексана каждый для дальнейшего анализа (Bondetti et al., 2020).

Анализ проводили на газовом хроматографе Agilent 6890N с масс-спектрометром Agilent 5975C, используя колонку HP-FFAP (длина 30 м, внутренний диаметр 250 мкм). Для управления прибором использовалось программное обеспечение MSD Chemstation версии E.02.02.1431. В качестве газа-носителя применялся гелий при скорости потока 1,1 мл мин⁻¹; проба вводилась в количестве 1 мкл с разделением потока 30:1. Температуры устройства ввода и интерфейса были установлены на 220 и 230 °C соответственно. Температурный режим работы печи: 120 °C в течение 1 мин; нагрев до 180 °C со скоростью 4 °C/мин, время удержания – 10 мин; нагрев до 220 °C со скоростью 4 °C/мин, время удержания – 12 мин; нагрев до 230 °C со скоростью 10 °C/мин, время удержания – 36 мин; итого продолжительность анализа – 85 мин. Для ионизации образцов использовали электронный удар (70 эВ). Температуры источни-

ка и квадруполь составляли соответственно 230 и 150 °С. Для идентификации соединений и их времени выхода в образцах внешних стандартов регистрировался спектр ионов с отношением массы к заряду (m/z) от 35 до 550 (Demina et al., 2022).

Статистическое сравнение осуществляли с использованием критерия Вилкоксона (Лакин, 1980) в программе STATISTICA, версия 7 (StatSoft Inc., США).

Результаты

По суммарному содержанию жирных кислот, взятых с фрагментов сосудов (рис. 4), явно выделяется образец III (днище с внутренней стороны) сосуда № 9. Вероятно, этот сосуд использовался для приема пищи, на что указывает форма в виде миски. Суммарное содержание жирных кислот в образце I (внешняя поверхность) было достоверно меньше, чем в образцах II и III ($p = 0,0014$ и $p = 0,0023$ соответственно по критерию Вилкоксона) (рис. 5).

Было выявлено, что образцы жирных кислот включают в себя различные соединения с углеродной цепочкой от 10 до 22 атомов, преимущественно преобладают насыщенные

неразветвленные кислоты (табл. 1). Во всех изученных фрагментах сосудов были обнаружены 18:0, 16:0, 15:0, 14:0 и 12:0 кислоты.

Состав жирных кислот в образцах внутренних стенок является более разнообразным, чем на внешних стенках. В глубинных слоях определяются такие кислоты, которые отсутствуют на внешних стенках: ненасыщенные – 16:1 ω 7 и 22:1 ω 9; насыщенные – 11:0, 13:0, с разветвленной цепью – i14:0, i15:0, ai15:0, ai16:0 (рис. 6–8).

По составу жирных кислот сосуд № 12 заметно выделяется из всей выборки присутствием ненасыщенных жирных кислот на внутренних стенках и днище сосуда: 16:1 ω 7, 18:1 ω 9 и 22:1 ω 9 (рис. 7, 8). Также эти кислоты присутствуют в придонной части сосуда № 11, что свидетельствует о специфическом использовании сосудов № 11 и № 12.

Состав жирных кислот в образцах почвы (рис. 9) менее разнообразен, чем в керамическом тесте сосудов, кроме того, в почве отсутствуют ненасыщенные жирные кислоты. Различие состава жирных кислот в почве и в керамических образцах свидетельствует о том, что в сосудах действительно содержались пищевые продукты. Только в почвенных

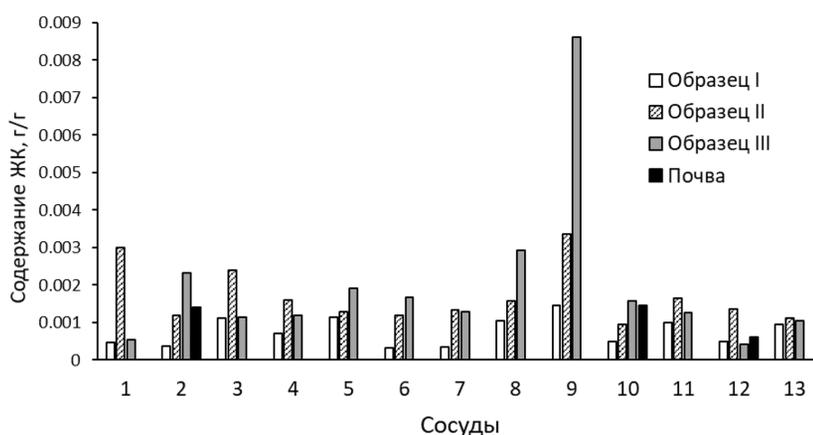


Рис. 4. Общее содержание жирных кислот в пробах, взятых с фрагментов керамических сосудов

Fig. 4. The total content of fatty acids in samples taken from fragments of pottery vessels

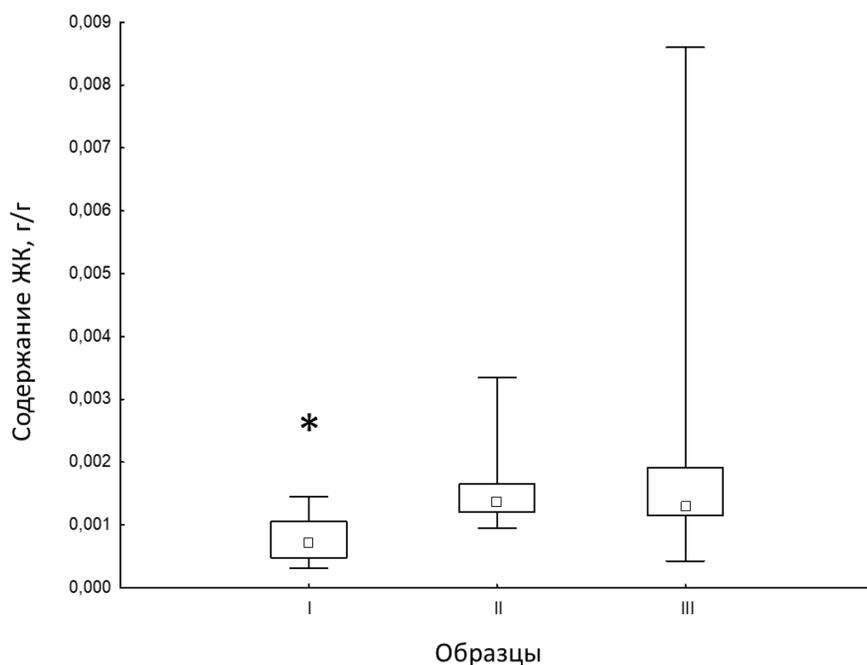


Рис. 5. Общее содержание жирных кислот в образцах, взятых с фрагментов керамических сосудов. Показаны медиана, 25–75 % квартили, максимальное и минимальное значения. Звездочкой обозначено достоверное отличие ($p < 0,01$ по критерию Вилкоксона)

Fig. 5. The total content of fatty acids in samples taken from fragments of pottery vessels. The median, 25–75 % quartiles, and the maximum and minimum values are shown. Asterisk indicates a significant difference ($p < 0.01$ according to the Wilcoxon test)

Таблица 1. Соотношения и интерпретирующие описания жирных кислот

Table 1. Ratios and interpretive descriptions of fatty acids.

	Кислота	Формула	Возможные источники*
Насыщенные	декановая (каприновая)	10:0	Молоко, животные жиры
	ундекановая (ундециловая)	11:0	Молоко, мясо/жир животных
	додекановая (лауриновая)	12:0	Молоко, растительные масла
	тридекановая (тридециловая)	13:0	Липиды бактерий
	12-метилтридекановая (изомиристиновая)	i14:0	Молоко, мясо/жир животных
	тетрадекановая (миристиновая)	14:0	Молоко, жир животных, растительные масла
	13-метилтетрадекановая (изопентадекановая)	i15:0	Животные жиры, липиды бактерий
	12-метилтетрадекановая (антеизопентадекановая)	ai15:0	Животные жиры, липиды бактерий
	пентадекановая (пентадециловая)	15:0	Молоко и животные жиры, липиды бактерий
	14-метилпентадекановая (изопальмитиновая)	i16:0	Животные жиры, липиды бактерий

Таблица 1. Продолжение

Table 1 Continued

	Кислота	Формула	Возможные источники*
	13-метилпентадекановая антеизопальмитиновая	ai16:0	Животные жиры, липиды бактерий
	гексадекановая (пальмитиновая)	16:0	Молоко, мясо/жир животных, растительные масла
	15-метилгексадекановая (изомаргариновая)	i17:0	Животные жиры, липиды бактерий
	гептадекановая (маргариновая)	17:0	Молоко и животные жиры, липиды бактерий
	октадекановая (стеариновая)	18:0	Животный жир
Ненасыщенные	цис-9-пальмитолеиновая (пальмито-олеиновая)	16:1 ω 7	Растительные масла
	цис-9-октадеценавая (олеиновая)	18:1 ω 9	Растительные масла, ихтиофауна, мясо/жир животных
	13-докозеновая (эруковая кислота)	22:1 ω 9	Растительные масла, ихтиофауна

*Таблица сделана на основании (Guðmundsson et al., 2021; Roffet-Salque et al., 2017; Regert, 2011).

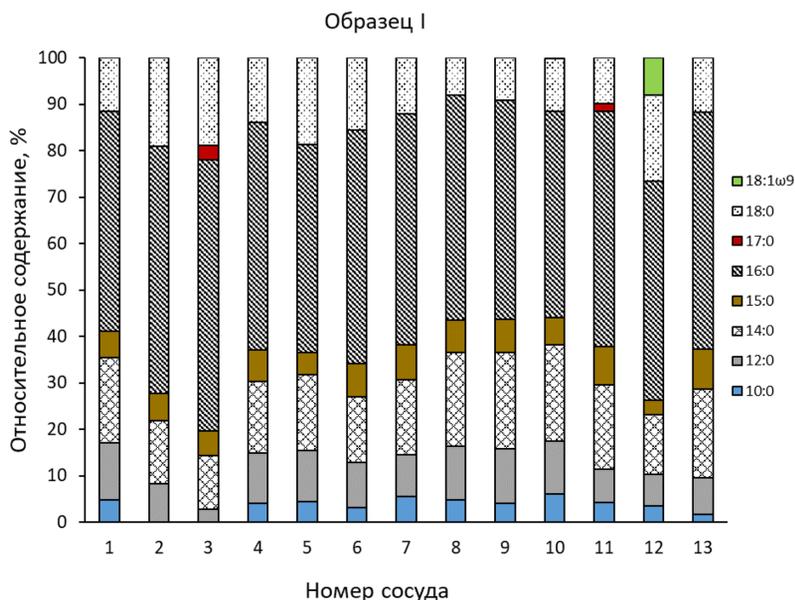


Рис. 6. Содержание жирных кислот в образцах I (внешняя стенка сосуда)

Fig. 6. The content of fatty acids in samples I (the edge of the vessel)

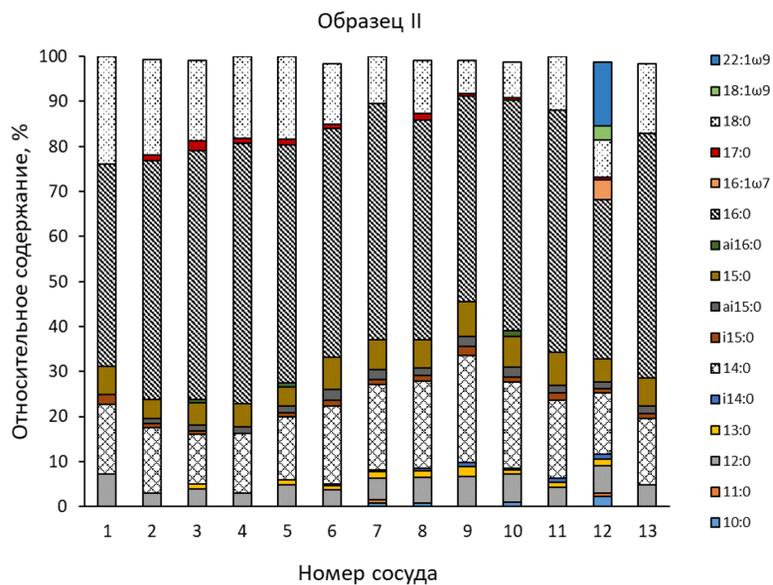


Рис. 7. Содержание жирных кислот в образцах II (придонная часть сосуда)

Fig. 7. The content of fatty acids in samples II (near the bottom part of the vessel)

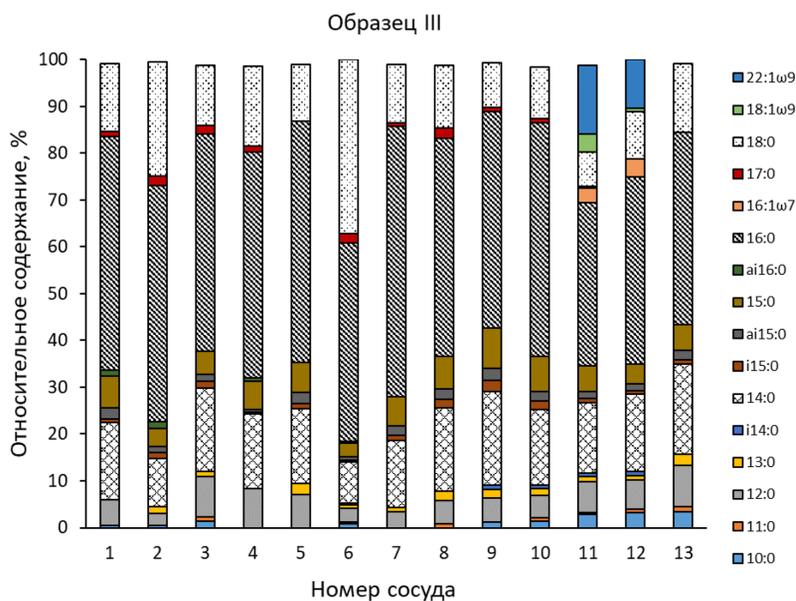


Рис. 8. Содержание жирных кислот в образцах III (донная часть сосуда)

Fig. 8. The content of fatty acids in samples III (bottom part of the vessel)

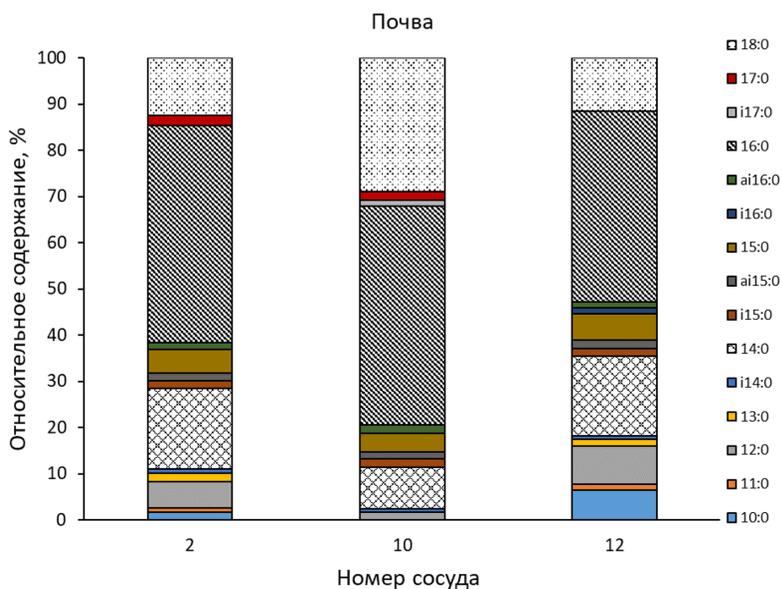


Рис. 9. Содержание жирных кислот в образцах IV (почва из заполнения сосуда)

Fig. 9. The content of fatty acids in samples IV (soil from the vessel)

образцах были зафиксированы i17:0 в сосуде № 10 и i16:0 в сосуде № 12.

По общему содержанию жирных кислот в различных слоях (рис. 6–9) видно, что в сосудах преобладают насыщенные кислоты: 12:0, 14:0, 16:0, 18:0 и 15:0. Остальные кислоты находятся в меньших количествах.

Обсуждение

Менее разнообразный состав (рис. 6–8) и меньшее суммарное содержание жирных кислот на внешних стенках сосудов по сравнению с внутренними (рис. 4, 5) свидетельствует, что эти сосуды использовались для хранения и/или приготовления жиросодержащих продуктов.

Большинство сосудов содержат высокие концентрации (в сумме более 80 %) 16:0 и 18:0 кислот, что объясняется их широкой распространенностью, а также возможным окислением полиенов. Однако в целом считается, что высокое содержание 16:0, 18:0, а также 14:0 кислот указывает на преимущественное

хранение продуктов животного происхождения (Evershed et al., 1997).

На внутренних стенках и донных частях сосудов № 11 и № 12 были выявлены ненасыщенные кислоты: 18:1 ω 9 и 22:1 ω 9, которые отсутствовали в прочих образцах (рис. 6–9). 18:1 ω 9 и 22:1 ω 9 кислоты являются веществами растительного или морского происхождения (Guðmundsson et al., 2021). Сосуд № 11 – баночной формы с боковыми ручками, у которого наблюдается скопление липидов в донной части. Сосуд № 12 – котловидной формы с поддоном, скопление липидов было зафиксировано в донной части и на стенках. Форма обоих сосудов может быть удобной для приготовления пищи, например для тушения или варки. Сосуд № 9 отличается большим общим содержанием жирных кислот. Можно утверждать, что он более интенсивно использовался в приготовлении и/или хранении пищи. Форма сосуда в виде миски свидетельствует о его использовании в качестве ёмкости для приема пищи.

В основном липиды накапливаются на поверхности керамических сосудов, и их концентрация уменьшается по профилю сосуда сверху вниз. Однако было отмечено, что они демонстрируют более высокую степень разложения из-за их контакта с воздухом, который способствует окислению (Evershed et al., 2008). Наличие ненасыщенных жирных кислот на поверхности сосуда, а именно олеиновой, возможно объясняется возникающими современными загрязнениями.

Во время отбора проб возможно некоторое перекрестное загрязнение почвы и черепков, поскольку обычно трудно полностью отделить почву от материала горшка из-за хрупкости керамических сосудов. Вероятно, сходство жирнокислотного состава образцов почвы и черепков может быть связано с тем, что компоненты впитались на крайних внешних поверхностях черепка (Heron et al., 1991).

Во внутренних стенках сосудов и в почве присутствуют жирные кислоты с разветвленной цепью изо- и антеизорядов. Такие кислоты являются признанными маркерами бактериальной активности, встречаются у многих бактерий в качестве основных ацильных компонентов мембранных липидов (Papakosta et al., 2019). Эти кислоты могли образоваться под действием бактериального разложения как в почве, так и в мясе жвачных животных. Поскольку такие кислоты образуются в пищеварительном тракте животных с многокамерным желудком под воздействием бактерий (Pozhidaev et al., 2021), нельзя исключать присутствие жиров жвачных животных в любом из этих сосудов. Тем не менее нельзя полностью отрицать возможность того, что эти кислоты могли образоваться в стенках сосудов в результате деятельности бактерий, которые перерабатывали остатки пищи. В результате чего жирные кислоты в стенках сосудов мо-

гут уже не быть связаны с жирными кислотами пищевых остатков.

Молочный жир трудно обнаружить в липидных остатках из-за того, что липидный состав молока со временем становится неотличимым от состава жировой ткани животных. Для точной идентификации хранения молока в сосудах требуется использование изотопного подхода (Copley et al., 2003; Evershed et al., 2008).

Заключение

В результате проведенного анализа было выявлено 18 жирных кислот, присутствующих в керамических образцах 13 сосудов. Качественный состав кислот в различных образцах был неоднородным. Во всех сосудах преобладали 14:0, 16:0, 18:0 кислоты, прочие кислоты содержались в меньших количествах. Присутствие более разнообразного спектра жирных кислот и более высокого их суммарного содержания на внутренних стенках сосудов, по сравнению с внешними, свидетельствует о том, что сосуды использовались для приготовления либо хранения пищи, что привело к адсорбции жирных кислот в керамическое тесто. Состав жирных кислот указывает на то, что в сосудах готовили/хранили продукты, в число которых возможно входили мясо и жир животных, молоко, а также продукты растительного происхождения.

На внутренних стенках и донных частях сосудов № 11 и № 12 были выявлены ненасыщенные кислоты: 16:1 ω 7, 18:1 ω 9 и 22:1 ω 9, которые отсутствовали в прочих образцах. Следовательно, можно предполагать, что данные сосуды использовались для приготовления или хранения продуктов питания растительного происхождения. Известно также, что кислота 22:1 ω 9 может быть маркером морской рыбы, тогда как у пресноводных рыб она бывает лишь в небольших количествах. Однако продукты морского происхождения на данной

территории вряд ли были доступны, следовательно, в нашем случае эта кислота скорее является маркером растительного происхождения. Керамический сосуд № 9 отличается большим общим содержанием жирных кислот. Вероятно, он более интенсивно использовался в приготовлении и/или хранении пищи.

В дальнейшем липидный анализ будет применяться для сравнения археологических образцов с целью выявления исторических закономерностей диеты, изменения хозяйственной деятельности древних людей, их миграций по Сибири и прилегающим территориям.

Список литературы / References

Азаров Е. С., Пожидаев В. М. (2020) Исследования органических остатков на керамике позднего бронзового века лесной полосы Восточной Европы методом ГХ/МС. *Труды VI (XXII) Всероссийского археологического съезда в Самаре, Том 3*. Самара, Самарский государственный социально-педагогический университет, с. 207–208 [Azarov E. S., Pozhidaev V. M. (2020) A study of organic residues on ceramics of the Late Bronze Age in the forest belt of Eastern Europe by GC/MS method. *Proceedings of the VI (XXII) All-Russian Archaeological Congress in Samara, Vol. 3*. Samara, Samara State University of Social Sciences and Education, p. 207–208 (in Russian)]

Кузьмин Н. (2011) *Погребальные памятники хунно-сяньбийского времени в степях Средне-го Енисея: Тесинская культура*. СПб., 456 с. [Kuzmin N. (2011) *Funerary monuments of the Hunno-Xianbian period in the steppes of the Middle Yenisei: Tesin culture*. St. Petersburg, 456 p. (in Russian)]

Кузьмин Я. В. (2017) *Геоархеология: естественно-научные методы в археологических исследованиях*. Томск, Издательский дом Томского государственного университета, 396 с. [Kuzmin Ya. V. (2017) *Geoarchaeology: methods of natural sciences in archaeological research*. Tomsk, Publishing House of Tomsk State University, 396 p. (in Russian)]

Лакин Г. Ф. (1980) *Биометрия*. Москва, Высшая школа, 293 с. [Lakin G. F. (1980) *Biometrics*. Moscow, Vysshaya shkola, 293 p. (in Russian)]

Мокрушин И. Г., Красновских М. П., Подосенова Ю. А., Сарапулов А. Н. (2020) Физико-химические методы анализа в археологических исследованиях. *Труды Камской археолого-этнографической экспедиции*, 17: 14–26 [Mokrushin I. G., Krasnovskikh M. P., Podosenova Yu. A., Sarapulov A. N. (2020) Physical-chemical methods of analysis in archaeological research. *Proceedings of the Kama Archaeological and Ethnographic Expedition* [Trudy Kamskoi arkheologoetnograficheskoi ekspeditsii], 17: 14–26 (in Russian)]

Bondetti M., Lucquin A., Savel'ev N. A., Weber A. W., Craig O. E., Jordan P. D. (2020) Resource processing, early pottery and the emergence of Kitoi culture in Cis-Baikal: Insights from lipid residue analysis of an Early Neolithic ceramic assemblage from the Gorelyi Les habitation site, Eastern Siberia. *Archaeological Research in Asia*, 24: 100225

Copley M. S., Berstan R., Dudd S. N., Docherty G., Mukherjee A. J., Straker V., Payne S., Evershed R. P. (2003) Direct chemical evidence for widespread dairying in prehistoric Britain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(4): 1524–1529

Demina I. A., Shulepina S. P., Ageev A. V., Sushchik N. N. (2022) Characterization of zoobenthos and export of biomass and polyunsaturated fatty acids due to emergence of midges (Diptera, Chironomidae) from three saline lakes of South Siberia. *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 15(4): 507–528 (in Russian)

Evershed R. P., Mottram H. R., Dudd S. N., Charters S., Stott A. W., Lawrence G. J., Gibson A. M., Conner A., Blinkhorn P. W., Reeves V. (1997) New criteria for the identification of animal fats preserved in archaeological pottery. *Naturwissenschaften*, 84(9): 402–406

Evershed R. P., Payne S., Sherratt A. G., Copley M. S., Coolidge J., Urem-Kotsu D., Kotsakis K., Özdoğan M., Özdoğan A. E., Nieuwenhuys O., Akkermans P. M. M. G., Bailey D., Andeescu R.-R., Campbell S., Farid S., Hodder I., Yalman N., Özbaşaran M., Bıçakçı E., Garfinkel Y., Levy T., Burton M. M. (2008) Earliest date for milk use in the Near East and southeastern Europe linked to cattle herding. *Nature*, 455(7212): 528–531

Guðmundsson Á., Walser III J. W., Naumovskaya M. K., Aðalbjörnsson B. V. (2021) Integration of fatty acid ratios analysis in archaeological research on Icelandic pottery from the Middle Ages. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 40(Part B): 103234

Heron C., Evershed R. P., Goad L. J. (1991) Effects of migration of soil lipids on organic residues associated with buried potsherds. *Journal of Archaeological Science*, 18(6): 641–659

Irto A., Micalizzi G., Bretti C., Chiaia V., Mondello L., Cardiano P. (2022) Lipids in archaeological pottery: A review on their sampling and extraction techniques. *Molecules*, 27(11): 3451

Papakosta V., Oras E., Isaksson S. (2019) Early pottery use across the Baltic—a comparative lipid residue study on Ertebølle and Narva ceramics from coastal hunter-gatherer sites in southern Scandinavia, northern Germany and Estonia. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24: 142–151

Pozhidaev V. M., Azarov E. S., Babichenko N. P., Kashkarov P. K., Yatsishina E. B. (2021) Biomarker for identification of fish products in residues on the surface of archaeological ceramics. *Nanobiotechnology Reports*, 16(5): 663–667

Regert M. (2011) Analytical strategies for discriminating archeological fatty substances from animal origin. *Mass Spectrometry Reviews*, 30(2): 177–220

Roffet-Salque M., Dunne J., Altoft D. T., Casanova E., Cramp L. J. E., Smyth J., Whelton H. L., Evershed R. P. (2017) From the inside out: Upscaling organic residue analyses of archaeological ceramics. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 16: 627–640

Van de Velde T., Deschepper E., Mestdagh B., De Clercq W., Vandenabeele P., Lynen F. (2019) Lipids, funerals, gifts and feasts. Organic residue analysis on Merovingian ceramics from the Elversele burial field (Belgium). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 24: 30–38

Wilkin S., Ventresca Miller A., Fernandes R., Spengler R., Taylor W. T.-T., Brown D. R., Reich D., Kennett D. J., Culleton B. J., Kunz L., Fortes C., Kitova A., Kuznetsov P., Epimakhov A., Zaibert V. F., Outram A. K., Kitov E., Khokhlov A., Anthony D., Boivin N. (2021) Dairying enabled Early Bronze Age Yamnaya steppe expansions. *Nature*, 598(7882): 629–633