

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНОМНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КРЕМИРОВАННЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ

© 2025 г. А.Б. Малярчук<sup>1,2,\*</sup>, И.Л. Кузнецова<sup>2,\*\*</sup>, Т.В. Андреева<sup>1,2,3,\*\*\*</sup>,  
С.С. Кунижева<sup>2,3,\*\*\*\*</sup>, А.Д. Сошкина<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>, Е.А. Клещенко<sup>4,\*\*\*\*\*</sup>,  
Л.В. Купцова<sup>5,\*\*\*\*\*</sup>, Н.Г. Свиркина<sup>4,\*\*\*\*\*</sup>, Н.А. Биркина<sup>6,\*\*\*\*\*</sup>,  
М.В. Добровольская<sup>4,\*\*\*\*\*</sup>, Е.И. Рогаев<sup>3,7,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Университет «Сириус», Сочи, Россия

<sup>4</sup>Институт археологии РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup>Оренбургский государственный педагогический университет, Оренбург, Россия

<sup>6</sup>Государственный исторический музей, Москва, Россия

<sup>7</sup>Медицинская школа Чан Массачусетского университета, Шрусбери, США

\*E-mail: a\_malyarchuk98@mail.ru

\*\*E-mail: irakuzn@vigg.ru

\*\*\*E-mail: andreeva@rogaevlab.ru

\*\*\*\*E-mail: kunizheva@vigg.ru

\*\*\*\*\*E-mail: soshkina@vigg.ru

\*\*\*\*\*E-mail: malzeva-ekaterina@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: orelin.84@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: svirkina.natalia@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: dulebova\_natalya@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: mk\_pa@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: evivrecc@gmail.com

Поступила в редакцию 28.10.2024 г.

После доработки 28.10.2024 г.

Принята к публикации 22.04.2025 г.

Археогенетические исследования динамично совершенствуют методики работы с различными категориями археологических материалов. Костные останки людей и животных, подвергшиеся воздействию огнем и высокой температурой, составляют существенную долю остеологических материалов. Вопрос о возможности их использования в генетических исследованиях до сих пор не имеет однозначного ответа. Воздействие высоких температур существенно усугубляет состояние деградированной ДНК в археологических образцах. Обзор опубликованных исследований ДНК в костных останках, подвергшихся воздействию огня и температуры, указывает на крайне низкую вероятность сохранения эндогенного генетического материала. Исследованы материалы захоронений по обряду кремации из памятников раннего железного века (сарматский курган у с. Тощкое Оренбургской области) и раннего средневековья (грунтовый могильник рязано-окской культуры Городище 2 Рязанской области). Изученные образцы позволяют оценить сохранность эндогенной ДНК в зависимости от величины и характера температурного воздействия. Опубликованные ранее результаты и настоящие исследования дают основание сформировать основные рекомендации к методике оценки сохранности ДНК в костных останках, подвергшихся воздействию огня и температуры. Публикации без информации об оценке ДНК не могут рассматриваться как достоверный источник палеогенетических данных.

**Ключевые слова:** кремация, характер термического воздействия, древняя ДНК, генетический анализ кремированных останков.

DOI: 10.31857/S0869606325030085

Палеогенетика, бурно развивающаяся в последние 20 лет, существенно меняет общий ландшафт исследований древнего и средневекового населения. Один из ключевых вопросов — сохранность древней ДНК. На качество сохранившейся ДНК влияет множество факторов: абсолютный возраст образца, условия окружающей среды, в которой пребывали останки, структурные свойства исследуемого участка скелета (Smith, 2003; Misner, 2009). Большое значение имеет и сама погребальная обрядность. Носители ряда археологических культур в разные периоды истории человечества практиковали кремацию как основной вид погребального обряда.

Оценка возможности включения обожженных костей в круг источников палеогенетических исследований важна, так как ранние свидетельства термического воздействия на останки человека в погребальной обрядности восходят к верхнему палеолиту (Добровольская, 2010). Кремация практикуется в некоторых европейских культурах мезолита и неолита, получает более широкое распространение в эпоху раннего металла в Евразии и становится преобладающей в раннем железном веке и раннем средневековье в Европе. Вопрос возможности исследования наследственной информации для культур с кремационным типом погребального обряда остается открытым. В археологической практике также известны находки полубоженных костей, частично подвергшихся термической обработке, например останки жертв пожаров.

В связи с этим актуальна подготовка систематического обзора работ, результаты которых получены на скелетном материале, подвергнутому воздействию огня и/или высокой температуры. Мы также представляем результаты экспериментального исследования кремированных образцов с использованием методов полногеномного секвенирования ДНК. На основании анализа этой совокупности данных формулируются разработанные рекомендации по использованию такого материала для генетических исследований, а также критерии оценки достоверности получаемых генетических данных.

*Физико-химические характеристики горения останков.* На основе физико-химических изменений выделяют четыре основные фазы горения костей: при температуре до 250 °С наблюдается дегидратация кости; при температуре горения 400–550 °С начинается распад белков и липидов под действием пиролиза, при 600–700 °С происходит распад карбоната кальция, после чего начинается изменение кристаллической матрицы

(Thompson, 2004). Каждая стадия характеризуется определенным цветом кости. Так, при температуре до 200 °С кости млекопитающих имеют желтоватый оттенок, при 400 °С — черный, 500 °С — серый, при переходе в фазу распада карбонатов кальция происходит смена цвета на серый и голубовато-серый (Devlin, Hermann, 2008; Клещенко, Решетова, 2019).

*Исследования сохранности ДНК из современных сожженных останков.* Вопрос использования сгоревших в пожарах или при другом сильном температурном воздействии останков важен для криминалистов, поскольку часто получение генетических данных — единственный способ идентификации останков. Молекулы ДНК разрушаются на сравнительно ранней стадии процесса горения (Imaizumi et al., 2014), после чего генетический анализ становится невозможным. Важным параметром, от которого зависит возможность использования ДНК для генетического анализа, является размер доступных в образце фрагментов ДНК, необходимых для применения того или иного генетического метода.

Наиболее распространенный метод ДНК-идентификации современных образцов — анализ коротких tandemных повторяющихся последовательностей (STR-маркеров, Short tandem repeats), состоящих обычно из 3–4 нуклеотидов. Число таких повторов высоковариабельно и различно в геномах разных людей, и их общая длина определяет соответствующий аллель STR-маркера. Для идентификации человека обычно учитываются STR-маркеры в составе аутосом и Y-хромосомы. Длина аллелей стандартных STR-маркеров, входящих в большинство наборов для идентификации личности, достигает 467 пар нуклеотидов (далее п.н.). Для криминалистических задач, где ДНК может быть частично деградированной, разработаны наборы, содержащие только мини-STR-маркеры с наиболее короткими вариантами аллелей. Например, достаточно часто используется набор MiniFiler™ kit, в котором длины аллелей находятся в диапазоне от 71 до 250 п.н. (Mulero et al., 2008).

Для исследования материнской линии индивида и определения гаплогрупп митохондриальной ДНК (мтДНК) используют участки гипервариабельных участков мтДНК. Длина ПЦР-продуктов, полученных с помощью наборов, широко используемых в криминалистике, составляет более 100 п.н., например, для набора PowerSeq CRM диапазон ПЦР-продуктов составляет 147–237 п.н. (Brandhagen et al., 2020).

Также для определенных задач в области ДНК-идентификации используются однонуклеотидные маркеры, для которых минимальная длина ампликона может составлять около 60 п.н. Таким образом, пригодность современного генетического материала для ДНК-идентификации многие исследователи оценивают по длине доступных для анализа фрагментов ДНК, а следовательно, возможности получения соответствующих ампликонов для STR-маркеров, участков мтДНК и отдельно более коротких ампликонов для анализа однонуклеотидных вариантов в геноме.

Для изучения процесса деградации ДНК непосредственно в костной ткани проведено несколько исследований, посвященных возможности анализа STR-маркеров в образцах ДНК, выделенной из сожженных современных образцов компактных костей без мягких тканей крупного рогатого скота. Кости подвергали различным режимам температурной обработки до температуры горения 250–300 °С (Imaizumi et al., 2014; Fredericks et al., 2015). В результате экспериментов показано, что для успешной амплификации стандартных STR-маркеров и мини-STR-маркеров температура горения костей не должна превышать 180–200 °С, а время – 15 мин. Амплификация коротких (100 п.н.) фрагментов ДНК и анализ в них однонуклеотидных замен был возможен при воздействии на кость температуры до 200–210 °С в течение 30 мин. (Fredericks et al., 2015). Для исследования скорости деградации ДНК под воздействием огня кости и зубы собак сжигали в лабораторной печи при температуре 400 °С в течение разных периодов времени (от 5 до 60 мин.) (Grela et al., 2021). Показано, что при такой температуре ДНК, пригодную для анализа коротких ампликонов (около 100 п.н.), можно получить только из образцов, подвергавшихся горению не более 15 мин. При этом бедренные кости оказались более подходящим материалом, чем зубы. В случае образцов, содержащих и костную, и мягкие ткани, значения предельной температуры для последующего выделения ДНК могут возрастать. Так, после сжигания головы кабана при 625 °С в течение 1 ч из зубов удалось выделить и амплифицировать ДНК (Rees, Cox, 2010). Однако, при экстраполяции полученных данных на человека, следует учитывать, что строение костей домашних и диких животных несколько отличается от человеческих (Mulhern, Uberlaker, 2001).

При краткосрочной (2–10 мин.) термической обработке человеческих зубов до 500 °С была возможна амплификация мини-STR маркеров

(Maciejewska et al., 2015), а Y-STR маркеров до 300 °С (Tsuchimochi et al., 2002). Возможность получения фрагментов мтДНК длиной около 150 п.н. продемонстрирована на костном материале, который в течение 5 мин. нагревали при 900 °С (Maciejewska et al., 2015).

Есть опыт выделения и идентификации ДНК человека из костей, обожженных в результате пожара (Schwark et al., 2011). Определено пять степеней сожжения: хорошо сохранившиеся, полуобожженные, черные, серо-голубые, серо-бело-голубые (горевшие при температуре, превышающей 650 °С). Полученные препараты ДНК использовали для STR-анализа и изучения последовательностей мтДНК. В результате показано, что достоверная генетическая идентификация возможна только для хорошо сохранившихся и полуобгоревших образцов. В черных костях ДНК, особенно ядерная, сильно фрагментирована, но возможен анализ мтДНК. Изучение серо-голубых костей приводит к получению аутентичных профилей в единичных случаях, в то время как исследование серо-бело-голубых обгоревших костей не дает достоверных результатов.

Оценена возможность получения ДНК из фрагментов височных костей современных мелико-криминалистических сожженных образцов (Gaudio et al., 2019). Для разных участков сожженных височных костей отмечена разная цветность и соответственно различная степень повреждения вследствие термического воздействия. Так, внешняя поверхность височной кости была частично обуглена, цветовой разброс позволил оценить температуру воздействия на нее 285–645 и 525–940 °С для различных образцов. Каменистая часть височной кости была полусожжена для одного образца (20–285 °С) и частично обуглилась в наиболее поврежденном образце (285–645 °С). Слуховая капсула во всех образцах подверглась наименьшему повреждению (20–285 °С), что позволило получить геномные данные эндогенной ДНК с высоким процентом картированных на геном человека прочтений (32.33–36.53%). Таким образом, внутренняя часть височной кости служит лучшим материалом для получения препаратов ДНК в случае теплового повреждения.

Возможность использования частей не полностью сожженных скелетов для установления личности продемонстрирована еще в 2009 г. при идентификации останков царской семьи Романовых (Rogaev et al., 2009). При проведении экспертизы использовано несколько методологических подходов, позволивших с высокой

точностью и достоверностью провести генетическую идентификацию скелетов, которые были подвергнуты воздействию огня. Во-первых, для анализа были отобраны фрагменты скелетов, которые не несли на себе следы явного термического воздействия (изменение цветности кости, растрескивания и деформации). Все экспериментальные работы проводили в нескольких независимых лабораториях для снижения риска контаминации и независимой проверки и подтверждения результатов анализа. В статье обращается внимание на то, что при анализе малых количеств ДНК возможно так называемое выпадение аллеля, когда один из аллелей, присутствующих в образце, не обнаруживается в результате амплификации ДНК, что может приводить к детекции ложных гомозиготных генотипов. Для минимизации вероятности такой ошибки проводили множественные независимые реакции амплификации с использованием негативных контролей, а для включения того или иного аллеля в генетический профиль соответствующего образца требовалось по 3–4 независимых наблюдения этого аллеля. В результате комплексного генетического анализа ядерной и митохондриальной ДНК из исследованных костных фрагментов и сравнения с другими останками членов семьи Романовых и их современных родственников была подтверждена гипотеза о том, что исследованные останки молодой девушки и мальчика принадлежат великой княжне Анастасии и цесаревичу Алексею (Rogaev et al., 2009).

*Исследования ДНК из древних останков, подвергшихся термическому воздействию.* В палео-генетических исследованиях прежде всего необходимо убедиться, что проводится анализ эндогенной древней ДНК. В археологизированных материалах, подвергшихся термическому воздействию, деградация ДНК происходит как из-за высокой температуры, так и прогрессирующей постмортальной деградации. На практике, как правило, древняя ДНК (из образцов от палеолита до средних веков), не подвергавшаяся высокотемпературной обработке, представляет собой фрагменты ДНК длиной преимущественно до 100 п.н. с постмортальными модификациями, из которых наиболее распространено дезаминирование нуклеиновых оснований (Андреева, Быданов и др., 2023). Соответственно, для термически обработанных древних образцов ожидаем такую же или еще меньшую длину фрагментов.

Анализировать очень короткие фрагменты длиной от 30–50 п.н. и наличие постмортальных химических модификаций возможно методами,

основанными на глубоком секвенировании геномной ДНК. Подходы, основанные на секвенировании по методу Сенгера, также могут быть использованы для оценки постмортальных модификаций, хотя не позволяют анализировать очень короткие фрагменты ДНК. STR-анализ малоэффективен для исследования сожженных образцов в связи с отсутствием в них фрагментов достаточной длины, кроме того, при данном подходе невозможно подтвердить, что исследуется именно древняя ДНК, а не современное загрязнение.

Особый пример высокотемпературного воздействия – останки жителей г. Помпеи, погибших в результате извержения Везувия в 79 г. н.э. Исследованы тела 13 погибших в одном доме, вероятно, от пирокластического потока (Cipollaro et al., 1998; Di Bernardo et al., 2009). Как полагают авторы, воздействие пирокласты могло привести к нагреванию до не более 100 °С, а застывший слой пирокласты создал благоприятные условия для сохранности дДНК. Секвенирование коротких фрагментов мтДНК позволило оценить родственные связи по материнской линии между исследованными индивидами (Di Bernardo et al., 2009). К настоящему моменту проведен полногеномный анализ для шести жертв извержения Везувия из Помпей – удалось установить их генетический пол и предположительное происхождение (Scorrano et al., 2022; Pilli et al., 2024). В г. Геркуланум, также пострадавшем от извержения Везувия, найдены останки, подвергшиеся воздействию более высокой температуры (около 300 °С). Из четырех образцов костного материала красно-коричневого оттенка была выделена ДНК в низкой концентрации и только для одного получилось амплифицировать участки длиной 112 и 106 п.н. (Guarino, 2017). Секвенирование этих фрагментов по методу Сенгера показало присутствие замен C>T и G>A, характерных для древней ДНК, что свидетельствовало об аутентичности полученной ДНК.

Проведено изучение частично обугленных костных останков трех человек, погибших в одном из московских пожаров XIV в. (раскопки в Тайницком саду Кремля) (Альборова и др., 2021). Авторы показали результаты определения гаплогрупп мтДНК для всех образцов и Y-хромосомы для индивидов мужского пола (они оказались типичными для современных европейцев). По результатам анализа, проведенного с использованием системы генотипирования InnoTyper21 Kit, основанной на анализе достаточно коротких фрагментов ДНК (60–125 п.н.),

и данных секвенирования гипервариабельных сегментов мтДНК, сделан вывод о родстве девушки и ребенка. Тем не менее к результатам, полученным вследствие мишень-направленной ПЦР-амплификации фрагментов ДНК, следует относиться с большой осторожностью. Потенциальное множество копий загрязняющей современной ДНК может приводить к получению ложного результата, но авторы работы не приводят никаких доказательств аутентичности исследованной ДНК. Также в работе не представлены итоги повторных независимых экспериментов, необходимых для подтверждения достоверности выявленных генетических маркеров и отсутствия «выпадающих аллелей» при определении гомозиготных генотипов.

Кости животных, подвергшихся кулинарной обработке, также могут быть использованы для исследования ДНК (Ottoni et al., 2009). Авторам удалось выделить древнюю ДНК и исследовать участки мтДНК из фрагментов костей крупного рогатого скота из памятника IX–X вв. Для доказательства аутентичности полученной ДНК использовали праймеры для амплификации коротких фрагментов мтДНК (длиной 62 и 128 п.н.). Показано, что ДНК в древних образцах имеет специфичный для древней ДНК характер повреждений: количество коротких фрагментов в образцах было значительно большим, чем длинных. Дополнительно, для исключения возможных артефактов и загрязнений в процессе амплификации, авторы клонировали и секвенировали амплифицированные фрагменты. Это позволило доказать, что полученные в результате амплификации фрагменты ДНК соответствуют ожидаемым участкам мтДНК и не содержат контаминирующих последовательностей. Кроме того, показано, что нагревание костей до температур ниже 140 °С потенциально может улучшить сохранность ДНК из-за инактивации нуклеаз, которые активны на ранних стадиях деградации костей (Ottoni et al., 2009).

Перечисленные выше случаи успешного анализа древней ДНК из останков, подвергнутых воздействию высокой температуры, представляют сценарий, при котором температурное воздействие не было связано с открытым пламенем или костные фрагменты сгорали не полностью. Однако в случае работы с кремированными останками, когда мягкие ткани не сохраняются, а твердые сильно повреждены, вероятность получения генетических данных снижается, так как высокотемпературная кремация вероятно приводит к фрагментации ДНК (Harvig et al.,

2014). В частности, проведены сравнения качества древней ДНК (Hansen et al., 2017), полученной из фрагментов зубов и височных костей, в анализ также включили семь древних образцов кремаций из Дании 500–850 гг. Несмотря на то что кремированные образцы представлены височными костями, они характеризуются крайне низким содержанием эндогенной ДНК (менее 0.03%). Вместе с практически полным отсутствием характерного для древней ДНК дезаминирования С>Т на концах прочтений (частота замен не превышала 2%) это позволило авторам сделать вывод об отсутствии аутентичной древней ДНК во всех семи образцах и признать такой тип материала неподходящим для палеогенетических работ.

*Исследование кремированных образцов из археологических памятников Оренбургской и Рязанской областей.* Как показано выше, основными факторами сохранности эндогенной ДНК можно считать температуру, длительность термического воздействия, условия нахождения останков на протяжении длительного времени. В задачи настоящего исследования входила проверка наличия эндогенной ДНК в образцах, подвергшихся в силу отличий типов погребального обряда разному воздействию температуры и огня. Ранее успешно проведены палеогенетические исследования индивидов, отнесенных ко времени от палеолита до средневековья (Андреева и др., 2021, 2024; Андреева, Добровольская и др., 2023; Андреева, Малярчук и др., 2023; Рождественских и др., 2024, Сыроватко и др., 2024). С использованием разработанного нами метода выделения ДНК (Andreeva, 2022) возможно получение препаратов ДНК человека с высоким содержанием эндогенной ДНК (до 90%), пригодной для анализа.

1. Сарматское погребение у с. Тоцкое в Оренбургской области. В результате раскопок кургана, датируемого IV в. до н.э., обнаружены кремированные останки 12 человек (Клещенко и др., 2021). Предположительно, это было коллективное сожжение на месте индивидов разного пола и возраста с неравномерным распространением температуры. Прокал насыпи позволяет судить о том, что закрытие грунтом происходило во время кремирования. Это могло уменьшить продолжительность контакта с огнем и обеспечить длительное прокаливание при разных температурах в разных частях кургана. Костные останки из разных участков площадки характеризуются различной цветностью: белый и серый цвета соответствуют температурам 750 °С

и выше; коричневый с черным — 300–400 °С. Сожжение всех останков проводили одновременно (степень их разложения на тот момент была различной). Этот погребальный обряд редок и не типичен для кочевников раннего железного века (Сдыков, Лукпанова, 2013; Гречко, 2015; Володин, 2018).

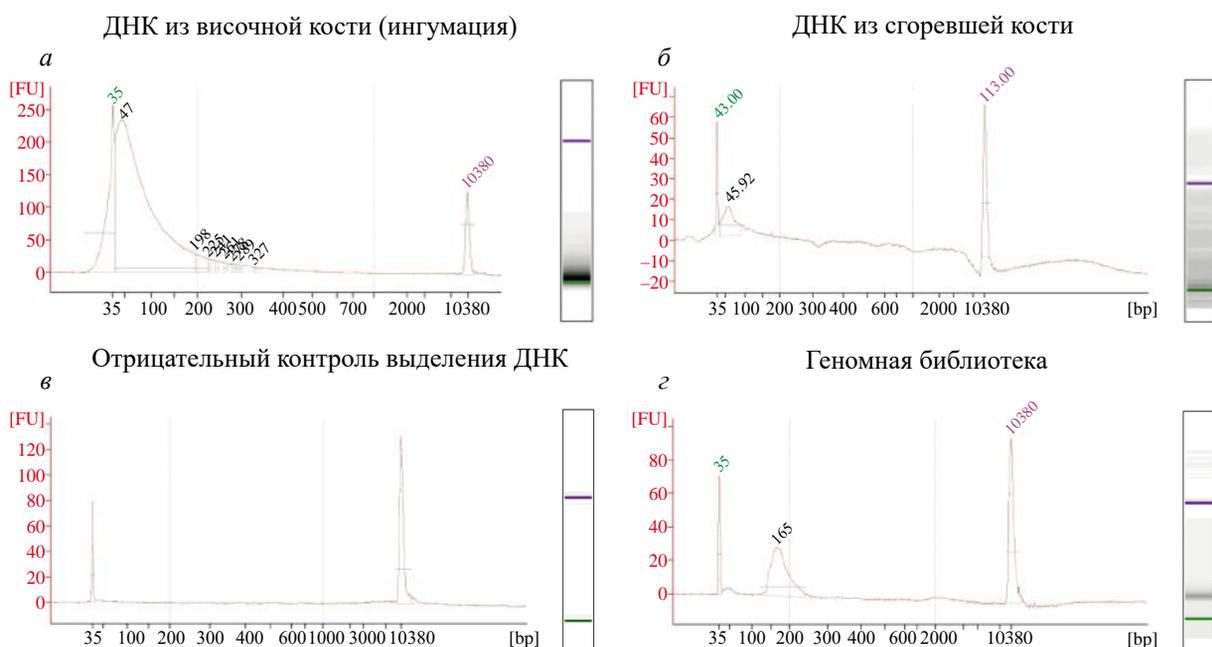
2. Могильник Городище 2 у с. Константиново и д. Городище в Шировском р-не Рязанской обл. Это биритуальный могильник рязано-окских финнов IV–VII вв. с ингумациями и кремациями (Биркина, Свиркина, 2023). Погребения с кремированными останками образуют отдельную группу в западной части памятника и датируются VII в. Обряд предполагал сожжение на стороне. Все кремации индивидуальные, высокотемпературные, были произведены вскоре после смерти, что следует из белого цвета и растрескиваний костных останков, содержат фрагменты костей всего скелета. Они находятся в толще культурного слоя и в ямах на глубине, аналогичной для ингумаций. В погребениях с кремациями присутствуют характерные черты обрядности рязано-окских финнов, к которым относятся наличие в могильных ямах даров (предметов, нетипичных для пола погребенного), керамики

и углей, а также покрытие погребенного лубом (Биркина, Свиркина, 2023).

Оценку качества полученной ДНК проводили на приборе Agilent Bioanalyzer 2100 (рис. 1). При анализе ДНК из всех кремированных образцов наблюдалось присутствие коротких (менее 100 п.н.) фрагментов (рис. 1, б). Из каждого образца приготовлены библиотеки для полногеномного секвенирования (Gansauge et al., 2017) (рис. 1, з). После глубокого секвенирования библиотек проведен стандартный биоинформатический анализ (Schubert et al., 2016) с оценкой уровня дезаминирования (рис. 2).

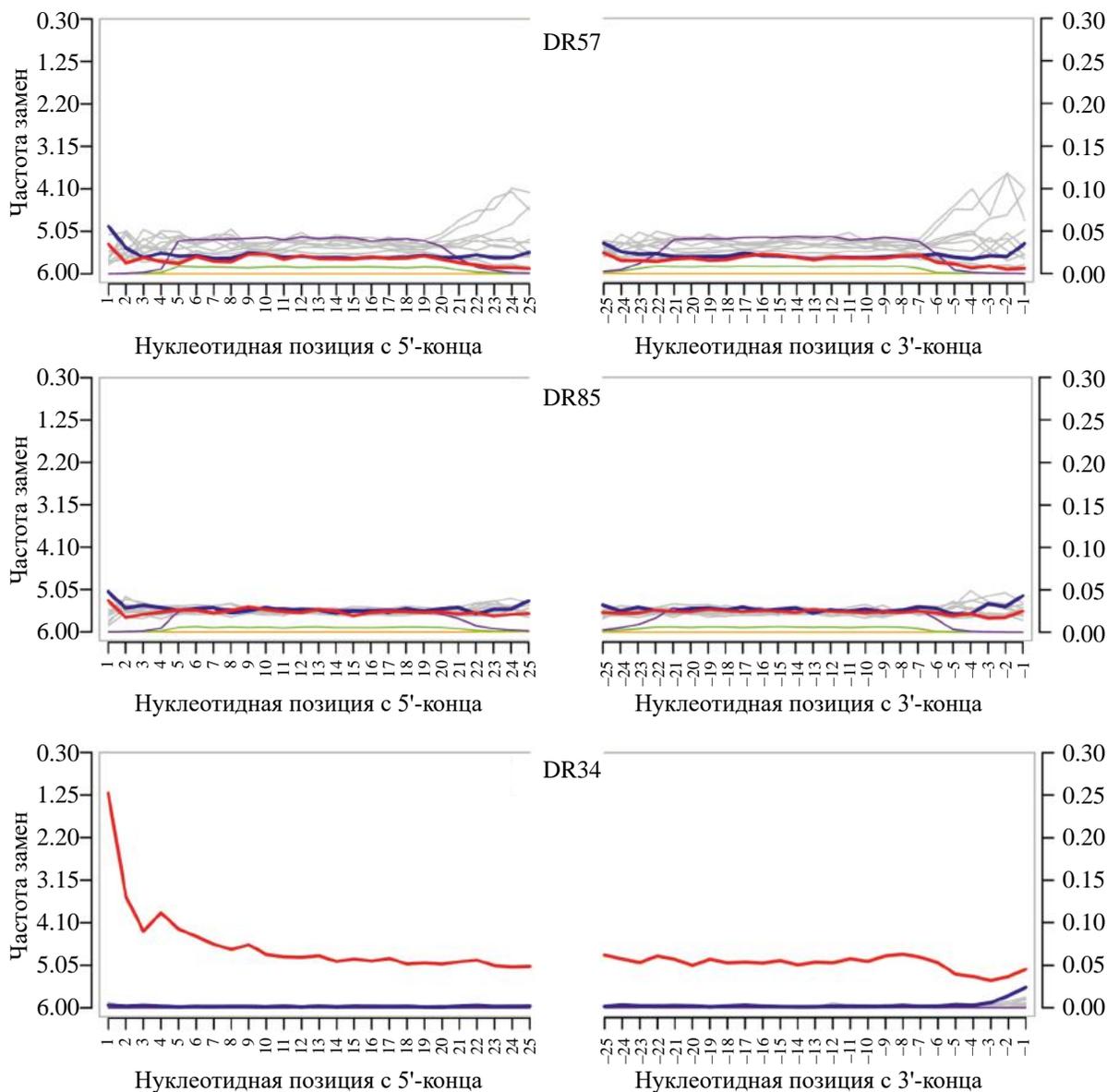
Степень постмортального дезаминирования ДНК из кремированных образцов ниже, чем средняя степень в древней ДНК, что свидетельствует о малой вероятности аутентичности выделенной ДНК. Так, частота транзиций С>Т в первой позиции на 5'-концах прочтений варьирует от 1.57 до 4.16%, в то время как этот показатель для древних образцов, как правило, превышает 10% (табл. 1; рис. 2).

Результаты секвенирования (табл. 2) 16 образцов продемонстрировали низкое содержание человеческой ДНК — в кремированных костных останках процент картирования на геном человека не превышает 5%. При этом самыми



**Рис. 1.** Результаты оценки качества ДНК из не подвергшейся термическому воздействию кости древнего индивида (а), ДНК, выделенной из кремированных костных останков DR64 (б), отрицательного контроля выделения ДНК (в) и геномной библиотеки для кремированного образца DR62 (з). Проведена на приборе Agilent Bioanalyzer 2100, маркеры длины представлены пиками 35 пар нуклеотидов (п.н.) и 10380 п.н.

**Fig. 1.** Results of quality assessment of DNA from non-heat-treated ancient individual (а), DNA isolated from cremated DR64 bone remains (б), a negative control for DNA isolation (в) and a genomic library for a cremated DR62 sample (з)



**Рис. 2.** Профиль замен С > Т (красная линия) для прочтений, картированных на референсный геном человека для образцов из кремаций (DR57, DR85) и ингумации (DR34, Сыроватко и др., 2024). Кремированные образцы характеризуются отсутствием характерного для древней ДНК повышенного уровня дезаминирования на концах фрагментов.

**Fig. 2.** Profile of C > T substitutions (red line) for reads mapped to the human reference genome for samples from cremations (DR57, DR85) and an inhumation (DR34, Syrovatko et al., 2024). Cremated samples are distinguished by the absence of the level of deamination characteristic of ancient DNA

низкими показателями картирования характеризуются образцы белого каления, а самыми высокими — кости темного цвета.

*Методические рекомендации для генетического анализа кремированного биоархеологического материала.* На основе результатов проведенного систематического литературного обзора и полученных экспериментальных данных разработаны следующие рекомендации.

1. В настоящее время наиболее перспективные методы исследования древней ДНК в целом, а также древней ДНК, подвергшейся воздействию огня и/или высокой температуры, основаны на использовании технологии массивного параллельного секвенирования. Это дает возможность в рамках одного эксперимента получить генетическую информацию сразу для большого числа коротких (от 30–50 п.н.) фрагментов ДНК.

**Таблица 1.** Список костных образцов, использованных для анализа**Table 1.** List of bone samples used for analysis

№	Погребение	Тип кости	Пол, возраст	Цвет от термического воздействия	Фотография образца	Тип воздействия огня	Температура горения
Тоцкое, курган 1, погребение 1 (Оренбургская область)							
DR56	Скелет 1	Надколенник	М, adultus	Серый/темно-серый		Прокаливание	550–750 °С
DR57	Скелет 2	Эпифиз малоберцовой кости	М, adultus	Светло-серый/белый		—«—	550–750 °С
DR58	Скелет 4	Фрагмент стенки длинной трубчатой кости	М, adultus	Коричневый/серый и черный		—«—	200–550 °С
DR59	Скелет 5	Пирамида височной кости	М, adultus	Светло-серый/белый		—«—	750 °С
DR60	Скелет 6	Нижний эпифиз большеберцовой кости	М, adultus	Черный		—«—	около 400 °С
DR61	Скелет 7	Плюсневая кость	М, adultus	черный		—«—	около 400 °С
DR62	Скелет 8	Теменная кость	М, maturus	Серый + голубой		—«—	около 550 °С
DR63	Череп 2	Пирамида височной кости		Серый + коричневый		—«—	300–550 °С

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continued

№	Погребение	Тип кости	Пол, возраст	Цвет от термического воздействия	Фотография образца	Тип воздействия огня	Температура горения
DR64	Скелет 9	Пирамида височной кости	Adultus	Черный + коричневый		—«—	300–400 °С
DR65	Скелет 10 (индивид 1)	Пирамида височной кости	Ребенок	Коричневый		—«—	около 300 °С
DR66	Скелет 10 (индивид 2)	Нижний эпифиз большеберцовой кости	Adultus	Серый/темно-серый		—«—	около 550 °С
DR67	Скелет 11	Зуб	Ребенок	Черный + коричневый		—«—	300–400 °С
Городище 2 (Рязанская обл.)							
DR73	Погр. 5	Пирамида височной кости	Ж?, adultus	Серый		Сожжение	750 °С
DR82	Погр. 27	—«—	Не опр., adultus	Серый/белый		—«—	750 °С

Таблица 1. Окончание

Table 1. The end

№	Погребение	Тип кости	Пол, возраст	Цвет от термического воздействия	Фотография образца	Тип воздействия огня	Температура горения
DR83	Погр. 33	—«—	Не опр., adultus	серый/белый		—«—	750 °C
DR85	Погр. 40	—«—	Не опр., adultus	серый/белый		—«—	750 °C

Таблица 2. Статистика по результатам секвенирования ДНК из образцов кремированных останков из исследованных памятников

Table 2. Statistics on the results of DNA sequencing from samples of cremated remains from the studied burials

Образец	Число прочтений	Содержание эндогенной ДНК, %	Геномное покрытие	Покрывтие мтДНК	Частота замен С>Т на 5'-концах фрагментов, %
Тощкое, курган 1, погребение 1 (Оренбургская область)					
DR56	3515421	1.32	0.0003	0.0046	2.56
DR57	2732176	1.30	0.0003	0.0015	3.48
DR58	5592151	2.27	0.0010	0.0129	2.67
DR59	1086982	0.75	0	0.0051	3.64
DR60	163496	4.81	0	0	1.57
DR61	101109	3.98	0	0	2.27
DR62	2475139	1.94	0.0003	0.0019	2.71
DR63	2796670	1.78	0.0004	0.0101	2.45
DR64	2329620	1.75	0.0003	0.0024	2.47
DR65	2387617	1.28	0.0002	0.0019	2.80
DR66	2922200	1.11	0.0003	0.0026	2.36
DR67	1376460	3.77	0.0004	0.0029	2.87
Городище 2 (Рязанская обл.)					
DR73	1542701	1.55	0.0002	0.0085	2.96
DR82	866225	0.97	0.0001	0.0129	4.16
DR83	2309463	0.66	0.0002	0.0082	3.36
DR85	2625227	0.78	0.0002	0.0071	3.72

2. При выделении ДНК необходимо использовать подходы, позволяющие экстрагировать и сохранять для анализа как можно более короткие фрагменты ДНК (от 30–50 п.н.), и контролировать (например с использованием высокочувствительных электрофоретических методов) размер полученных ДНК фрагментов, которые используются далее для приготовления геномных библиотек. Наиболее эффективная подготовка геномных библиотек из древней ДНК в настоящее время – использование одноцепочечных фрагментов ДНК, а не стандартные протоколы, применяемые для работы с современной ДНК. Для образцов крайне низкой степени сохранности перспективным может быть последующее дополнительное обогащение приготовленных фрагментных библиотек (например путем гибридизации) наиболее информативными фрагментами ДНК, соответствующими маркерам широко используемой в палеогеномных исследованиях панели из 1240К маркеров AADAR (Mallick et al., 2023).

3. Только при наличии в анализируемых последовательностях повышенной частоты замен С>Т, особенно на концах фрагментов ДНК, можно сделать вывод об аутентичности (древности) исследуемого образца ДНК, а полученные данные геномного секвенирования могут служить для выявления и анализа генетических маркеров.

4. Использование методов, основанных на предварительной амплификации ДНК (включая секвенирование по методу Сэнгера длинных фрагментов и фрагментный анализ STR-маркеров), малоэффективно для анализа древней ДНК в связи с крайне низким содержанием в археологических образцах фрагментов длиной более 100 п.н., которые могут быть проанализированы такими методами. Тем не менее в ряде случаев проведение такого анализа допустимо, но только при соблюдении требований, разработанных и успешно используемых в настоящее время в области криминалистики. В частности, обязательно проведение нескольких независимых экспериментов для подтверждения достоверности выявленных маркеров и доказательства аутентичности анализируемой ДНК.

В заключение отметим, что кремации не являются подходящим материалом для геномного анализа, даже при работе с височными костями. Однако остается перспективным подбор полуобожженных или сгоревших не до конца фрагментов скелета, особенно каменистой части

височной кости для оценки возможности получения генетических данных методами полногеномного или широкогеномного секвенирования.

Результаты получены при финансовой поддержке исследования, реализуемого в рамках государственной программы федеральной территории «Сириус» «Научно-технологическое развитие федеральной территории «Сириус», соглашение № 18–03 от 10.09.2024 (ТВА).

Работа выполнена в рамках плановой научной темы «Древнее и средневековое население Европейской части России в контекстах культурного развития и динамики генетического состава» (№ НИОКТР 124050700063-0).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альборова И.Э., Мустафин Х.Х., Медникова М.Б. и др.* Палеогенетический анализ жителей подола Московского Кремля XIV в. (по материалам раскопок в Тайницком саду) // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 4. История. Регионоведение. Международные отношения. 2021. Т. 26, № 5. С. 30–44.
- Андреева Т.В., Быданов А.С., Гусев Ф.Е., Рогов Е.И.* Первые результаты и перспективы медико-генетических исследований музейных и археологических образцов // Медицинская генетика. 2023. № 22. С. 3–11.
- Андреева Т.В., Добровольская М.В., Седов В.В. и др.* Люди из каменного саркофага № 11 Юрьева монастыря: генетическая история на основе митохондриальных геномов // Краткие сообщения Института археологии. 2023. Вып. 270. С. 418–437.
- Андреева Т.В., Жилин М.Г., Малярчук А.Б. и др.* Археогеномика человека из слоя Верхневолжской культуры – наибольшее генетическое сходство с восточно-европейскими охотниками-собираателями и древними представителями мезолита/неолита Европы // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2024. № 1. С. 113–125.
- Андреева Т.В., Малярчук А.Б., Григоренко А.П. и др.* Археогенетический анализ индивида из захоронения с территории древнего ярославского кремля // Краткие сообщения Института археологии. 2021. Вып. 265. С. 294–308.
- Андреева Т.В., Малярчук А.Б., Родинкова В.Е. и др.* Индивид волынцевского времени из Куриловки: первые археогенетические данные // Российская археология. 2023. № 3. С. 57–71.
- Биркина Н.А., Свиркина Н.Г.* Погребальный обряд у рязано-окских финнов по материалам могильника Городище-2 // Краткие сообщения Института археологии. 2023. Вып. 272. С. 175–192.
- Володин С.А.* Погребения с кремациями скифской эпохи на территории Среднего Подонья // Краткие

- сообщения Института археологии. 2018. Вып. 250. С. 229–242.
- Гречко Д.С.* Об особых видах погребений у населения восточноевропейской Лесостепи VII–IV вв. до н.э. // *Древности*. № 13. Харьков: Харьковский нац. ун-т им. В.Н. Каразина, 2015. С. 181–200.
- Добровольская М.В.* К методике изучения материалов кремации // *Краткие сообщения Института археологии*. 2010. Вып. 224. С. 85–97.
- Клещенко Е.А., Купцова Л.В., Свиркина Н.Г. и др.* Сожженные сарматские погребения IV в. до н.э.: методические аспекты изучения останков (по материалам I кургана III курганного могильника у с. Тоцкое Оренбургской области) // *Методические аспекты изучения древних и средневековых кремаций*. М.: ИА РАН, 2021. С. 47–52.
- Клещенко Е.А., Решетова И.К.* Палеоантропологические материалы в реконструкциях образа жизни и погребальной обрядности раннесредневекового населения Восточной Европы. М.: ИА РАН, 2019. 224 с.
- Рождественских Е.В., Манахов А.Д., Андреева Т.В. и др.* Юноша с хорьком из средневекового могильника Монино на Кубенском озере: археогенетическая идентификация // *Краткие сообщения Института археологии*. 2024. Вып. 274. С. 348–368.
- Сдыков М.Н., Лукпанова Я.А.* Ранние кочевники Западного Казахстана (на примере комплекса Таксай I). Уральск: Полиграфсервис, 2013. 292 с.
- Сыроватко А.С., Андреева Т.В., Кунижева С.С. и др.* Индивид из курганного погребения XII в. на Средней Оке – опыт комплексного археолого-генетического исследования // *Вестник археологии, антропологии и этнографии*. 2024. № 2. С. 119–131.
- Andreeva T.V., Manakhov A.D., Gusev F.E.* Genomic analysis of a novel Neanderthal from Mezmaiskaya Cave provides insights into the genetic relationships of Middle Palaeolithic populations // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. 13016.
- Brandhagen M.D., Just R.S., Irwin J.A.* Validation of NGS for mitochondrial DNA casework at the FBI Laboratory // *Forensic science international. Genetics*. 2020. Vol. 44. 102151.
- Cipollaro M., Di Bernardo G., Galano G. et al.* Ancient DNA in human bone remains from Pompeii archaeological site // *Biochemical and biophysical research communications*. 1998. Vol. 247. P. 901–904.
- Devlin J.B., Herrmann N.P.* Bone color as an interpretive tool of the depositional history of archaeological cremains // *The Analysis of Burned Human Remains / Eds. C.W. Schmidt, S.A. Symes*. London: Academic Press, 2008. P. 109–128.
- Di Bernardo G., Del Gaudio S., Galderisi U.* Ancient DNA and family relationships in a Pompeian house // *Annals of human genetics*. 2009. Vol. 73. P. 429–437.
- Fredericks J.D., Ringrose T.J., Dicken A.* A potential new diagnostic tool to aid DNA analysis from heat compromised bone using colorimetry: A preliminary study // *Science & justice: journal of the Forensic Science Society*. 2015. Vol. 55. P. 124–130.
- Gansauge M.T., Gerber T., Glocke I.* Single-Stranded DNA Library Preparation from Highly Degraded DNA Using T4 DNA Ligase // *Nucleic Acids Research*. 2017. Vol. 45, iss. 10. e79.
- Gaudio D., Fernandes D.M., Schmidt R.* Genome-Wide DNA from Degraded Petrous Bones and the Assessment of Sex and Probable Geographic Origins of Forensic Cases // *Scientific reports*. 2019. Vol. 9. 8226.
- Grela M., Jakubczak A., Kowalczyk M.* Effectiveness of various methods of DNA isolation from bones and teeth of animals exposed to high temperature // *Journal of forensic and legal medicine*. 2021. Vol. 78. 102131.
- Guarino F.M., Buccelli C., Graziano V. et al.* Recovery and amplification of ancient DNA from Herculaneum victims killed by the 79 AD Vesuvius hot surges // *Turkish Journal of Biology*. 2017. Vol. 41, № 4. P. 640–648.
- Hansen H.B., Damgaard P.B., Margaryan A.* Comparing Ancient DNA Preservation in Petrous Bone and Tooth Cementum // *PloS one*. 2017. Vol. 12. e0170940.
- Harvig L., Frei K.M., Price T.D.* Strontium isotope signals in cremated petrous portions as indicator for childhood origin // *PloS one*. 2014. Vol. 9. e101603.
- Imazumi K., Taniguchi K., Ogawa Y.* DNA survival and physical and histological properties of heat-induced alterations in burnt bones // *International journal of legal medicine*. 2014. Vol. 128. P. 439–446.
- Maciejewska A., Wlodarczyk R., Pawlowski R.* The influence of high temperature on the possibility of DNA typing in various human tissues // *Folia histochemica et cytobiologica*. 2015. Vol. 53, iss. 4. P. 322–332.
- Mallick S., Micco A., Mah M. et al.* The Allen Ancient DNA Resource (AADR): A curated compendium of ancient human genomes [Электронный ресурс] // *BioRxiv: the preprint server for biology*. 2023. URL: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2023.04.06.535797v1.full> (дата обращения: 08.05.2025).
- Misner L.M., Halvorson A.C., Dreier J.L.* The correlation between skeletal weathering and DNA quality and quantity // *Journal of forensic sciences*. 2009. Vol. 54. P. 822–828.
- Mulero J.J., Chang C.W., Lagacé R.E.* Development and validation of the AmpFISTR MiniFiler PCR Amplification Kit: a MiniSTR multiplex for the analysis of degraded and/or PCR inhibited DNA // *Journal of forensic sciences*. 2008. Vol. 53. P. 838–852.
- Mulhern D., Ubelaker D.* Differences in Osteon Banding Between Human and Nonhuman Bone // *Journal of forensic sciences*. 2001. Vol. 46, iss. 2. P. 220–222.
- Otoni C., Koon H.E.C., Collins M.J.* Preservation of Ancient DNA in Thermally Damaged Archaeological Bone // *Naturwissenschaften*. 2009. Vol. 96, № 2. P. 267–278.
- Pilli E., Vai S., Moses V.C.* Ancient DNA challenges prevailing interpretations of the Pompeii plaster casts // *Current biology*. 2024. Vol. 34. P. 5307–5318.

- Rees K.A., Cox M.J.* Comparative analysis of the effects of heat on the PCR-amplification of various sized DNA fragments extracted from Sus Scrofa molars // *Journal of forensic sciences*. 2010. Vol. 55. P. 410–417.
- Rogaev E.I., Grigorenko A.P., Moliaka Y.K.* Genomic identification in the historical case of the Nicholas II royal family // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2009. Vol. 106. P. 5258–5263.
- Schubert M., Lindgreen S., Orlando L.* AdapterRemoval v2: Rapid Adapter Trimming, Identification, and Read Merging // *BioMed Central Research Notes*. 2016. Vol. 9. 88.
- Schwark T., Heinrich A., Preusse-Prange A.* Reliable genetic identification of burnt human remains // *Forensic science international. Genetics*. 2011. Vol. 5. P. 393–399.
- Scorrano G., Viva S., Pinotti T.* Bioarchaeological and palaeogenomic portrait of two Pompeians that died during the eruption of Vesuvius in 79 AD // *Scientific reports*. 2022. Vol. 12. 6468.
- Smith C.I., Chamberlain A.T., Riley M.S.* The thermal history of human fossils and the likelihood of successful DNA amplification // *Journal of human evolution*. 2003. Vol. 45. P. 203–217.
- Thompson T.J.* Recent advances in the study of burned bone and their implications for forensic anthropology // *Forensic science international*. 2004. 146. P. S203–S205.
- Tsuchimochi T., Iwasa M., Maeno Y.* Chelating resin-based extraction of DNA from dental pulp and sex determination from incinerated teeth with Y-chromosomal aliphoid repeat and short tandem repeats // *The American journal of forensic medicine and pathology*. 2002. Vol. 23. P. 268–271.

## ASSESSING THE POSSIBILITY OF GENOMIC STUDY OF CREMATED ARCHAEOLOGICAL SAMPLES

**Aleksandra B. Malyarchuk<sup>1,2,\*</sup>, Irina L. Kuznetsova<sup>2,\*\*</sup>, Tatiana V. Andreeva<sup>1,2,3,\*\*\*</sup>,  
Svetlana S. Kunizheva<sup>2,3,\*\*\*\*</sup>, Anna D. Soshkina<sup>2,\*\*\*\*\*</sup>, Ekaterina A. Kleshchenko<sup>4,\*\*\*\*\*</sup>,  
Lidia V. Kuptsova<sup>5,\*\*\*\*\*</sup>, Natalia G. Svirkina<sup>4,\*\*\*\*\*</sup>, Natalya A. Birкина<sup>6,\*\*\*\*\*</sup>,  
Maria V. Dobrovolskaya<sup>4,\*\*\*\*\*</sup>, and Evgeny I. Rogaev<sup>3,7,\*\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup>*M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*N.I. Vavilov Institute of General Genetics RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Sirius University, Sochi, Russia*

<sup>4</sup>*Institute of Archaeology RAS, Moscow, Russia*

<sup>5</sup>*Orenburg State Pedagogical University, Orenburg, Russia*

<sup>6</sup>*The State Historical Museum, Moscow, Russia*

<sup>7</sup>*University of Massachusetts Chan Medical School, Shrewsbury, USA*

\*E-mail: a\_malyarchuk98@mail.ru

\*\*E-mail: irakuzn@vigg.ru

\*\*\*E-mail: andreeva@rogaevlab.ru

\*\*\*\*E-mail: kunizheva@vigg.ru

\*\*\*\*\*E-mail: soshkina@vigg.ru

\*\*\*\*\*E-mail: malzeva-ekaterina@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: olerin.84@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: svirkina.natalia@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: dulebova\_natalya@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: mk\_pa@mail.ru

\*\*\*\*\*E-mail: evivrecc@gmail.com

Archaeogenetic study is dynamically improving the techniques for working with different categories of archaeological materials. Bone remains of humans and animals after the fire and high temperatures impact account for a significant proportion of osteological materials. The problem of whether they can be used in genetic research still has no clear answer. High temperature impact significantly aggravates the state of degraded DNA of the archaeological samples. A review of published studies of DNA of the bone from the fire indicate an extremely low probability of preserving endogenous genetic material. The authors studied materials of cremations from two Early Iron Age sites (Sarmatian burial mound near the village of Totsoyko, Orenburg Region, and the ground cemetery of the Ryazan-Oka culture Gorodishche 2 in Ryazan Region). The studied samples make it possible to estimate the preservation of endogenous DNA depending on

temperature. The previously published results and the authors' studies provide grounds to formulate basic recommendations for the methodology of assessing the preservation of DNA in bone remains. Publications without information on DNA estimation cannot be considered as a reliable source of valid paleogenetic data.

**Keywords:** cremation, nature of heat treatment, ancient DNA, genetic analysis of cremated remains.

## REFERENCES

- Al'borova I.E., Mustafin Kh.Kh., Mednikova M.B. et al., 2021. Paleogenetic analysis of the residents of the Moscow Kremlin Podol (lower town) in the 14th century (based on materials from the excavations in the Taynit'sky Garden). *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4. Istoriya. Regionovedenie. Mezhdunarodnye otnosheniya [Science journal of Volgograd State University. History. Area Studies. International Relations]*, vol. 26, no. 5, pp. 30–44. (In Russ.)
- Andreeva T.V., Bydanov A.S., Gusev F.E., Rogaev E.I., 2023. First results and prospects of medical genetic studies of museum and archaeological samples. *Meditsinskaya genetika [Medical genetics]*, 22, pp. 3–11. (In Russ.)
- Andreeva T.V., Dobrovolskaya M.V., Sedov V.I. et al., 2023. People from stone sarcophagus No. 11 at the St. George's (Yuriev) Monastery: Genetic history based on mitochondrial genomes. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii [Brief Communications of the Institute of Archaeology]*, 270, pp. 418–437. (In Russ.)
- Andreeva T.V., Malyarchuk A.B., Grigorenko A.P. et al., 2021. Archaeogenetic analysis of an individual from a burial site at the ancient Yaroslavl Kremlin. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii [Brief Communications of the Institute of Archaeology]*, 265, pp. 294–308. (In Russ.)
- Andreeva T.V., Malyarchuk A.B., Rodinkova V.E. et al., 2023. An individual of the Volintsevo period from Kurilovka: first archaeogenetic data. *Rossiyskaya arkheologiya [Russian archaeology]*, 3, pp. 57–71. (In Russ.)
- Andreeva T.V., Manakhov A.D., Gusev F.E., 2022. Genomic analysis of a novel Neanderthal from Mezmaiskaya Cave provides insights into the genetic relationships of Middle Palaeolithic populations. *Scientific Reports*, 12, 13016.
- Andreeva T.V., Zhilin M.G., Malyarchuk A.B. et al., 2024. Archaeogenomics of humans from the layer of the Upper Volga culture revealed their greatest genetic similarity with Eastern European hunter-gatherers and ancient representatives of Mesolithic/Neolithic of Europe. *Vestnik arkheologii, antropologii i etnografii [Vestnik Arheologii, Antropologii i Etnografii]*, 1, pp. 113–125. (In Russ.)
- Birkina N.A., Svirkina N.G., 2023. The funerary rite of the Ryazan-Oka Finns based on the materials from the Gorodishche-2 cemetery. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii [Brief Communications of the Institute of Archaeology]*, 272, pp. 175–192. (In Russ.)
- Brandhagen M.D., Just R.S., Irwin J.A., 2020. Validation of NGS for mitochondrial DNA casework at the FBI Laboratory. *Forensic science international. Genetics*, 44, 102151.
- Cipollaro M., Di Bernardo G., Galano G. et al., 1998. Ancient DNA in human bone remains from Pompeii archaeological site. *Biochemical and biophysical research communications*, 247, pp. 901–904.
- Devlin J.B., Herrmann N.P., 2008. Bone color as an interpretive tool of the depositional history of archaeological remains. *The Analysis of Burned Human Remains*. C.W. Schmidt, S.A. Symes, eds. London: Academic Press, pp. 109–128.
- Di Bernardo G., Del Gaudio S., Galderisi U., 2009. Ancient DNA and family relationships in a Pompeian house. *Annals of human genetics*, 73, pp. 429–437.
- Dobrovolskaya M.V., 2010. On the method of investigations of cremation materials. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii [Brief Communications of the Institute of Archaeology]*, 224, pp. 85–97. (In Russ.)
- Fredericks J.D., Ringrose T.J., Dicken A., 2015. A potential new diagnostic tool to aid DNA analysis from heat compromised bone using colorimetry: A preliminary study. *Science & justice: journal of the Forensic Science Society*, 55, pp. 124–130.
- Gansauge M.T., Gerber T., Glocke I., 2017. Single-Stranded DNA Library Preparation from Highly Degraded DNA Using T4 DNA Ligase. *Nucleic Acids Research*, vol. 45, iss. 10, e79.
- Gaudio D., Fernandes D.M., Schmidt R., 2019. Genome-Wide DNA from Degraded Petrous Bones and the Assessment of Sex and Probable Geographic Origins of Forensic Cases. *Scientific reports*, 9, 8226.
- Grechko D.S., 2015. On peculiar types of burials among the population of the East European forest-steppe in the 7th–4th centuries BC. *Drevnosti [Antiquities]*, 13. Khar'kov: Khar'kovskiy natsional'nyy universitet imeni V.N. Karazina, pp. 181–200. (In Russ.)
- Grela M., Jakubczak A., Kowalczyk M., 2021. Effectiveness of various methods of DNA isolation from bones and teeth of animals exposed to high temperature. *Journal of forensic and legal medicine*, 78, 102131.
- Guarino F.M., Buccelli C., Graziano V. et al., 2017. Recovery and amplification of ancient DNA from Herculaneum victims killed by the 79 AD Vesuvius hot surges. *Turkish Journal of Biology*, vol. 41, no. 4, pp. 640–648.
- Hansen H.B., Damgaard P.B., Margaryan A., 2017. Comparing Ancient DNA Preservation in Petrous Bone and Tooth Cementum. *PloS one*, 12, e0170940.
- Harvig L., Frei K.M., Price T.D., 2014. Strontium isotope signals in cremated petrous portions as indicator for childhood origin. *PloS one*, 9, e101603.

- Imaizumi K., Taniguchi K., Ogawa Y.*, 2014. DNA survival and physical and histological properties of heat-induced alterations in burnt bones. *International journal of legal medicine*, 128, pp. 439–446.
- Kleshchenko E.A., Kuptsova L.V., Svirkina N.G. et al.*, 2021. Burnt Sarmatian burials of the 4th century BC: methodological aspects of studying remains (based on materials from mound 1 of the 3rd mound cemetery near the village of Totskoye, Orenburg Region). *Metodicheskie aspekty izucheniya drevnikh i srednevekovykh krematsiy [Methodological aspects of studying ancient and medieval cremations]*. Moscow: Institut arkheologii Rossiyskoy akademii nauk, pp. 47–52. (In Russ.)
- Kleshchenko E.A., Reshetova I.K.*, 2019. Paleoantropologicheskie materialy v rekonstruktsiyakh obraza zhizni i pogrebal'noy obryadnosti rannesrednevekovogo naseleeniya Vostochnoy Evropy [Paleoanthropological materials in reconstructions of the lifestyle and funerary rites of the early medieval population in Eastern Europe]. Moscow: Institut arkheologii Rossiyskoy akademii nauk. 224 p.
- Maciejewska A., Wlodarczyk R., Pawlowski R.*, 2015. The influence of high temperature on the possibility of DNA typing in various human tissues. *Folia histochemica et cytobiologica*, vol. 53, iss. 4, pp. 322–332.
- Mallick S., Micco A., Mah M. et al.*, 2023. The Allen Ancient DNA Resource (AADR): A curated compendium of ancient human genomes (Electronic resource). *BioRxiv: the preprint server for biology*. URL: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2023.04.06.535797v1.full>.
- Misner L.M., Halvorson A.C., Dreier J.L.*, 2009. The correlation between skeletal weathering and DNA quality and quantity. *Journal of forensic sciences*, 54, pp. 822–828.
- Mulero J.J., Chang C.W., Lagacé R.E.*, 2008. Development and validation of the AmpFISTR MiniFiler PCR Amplification Kit: a MiniSTR multiplex for the analysis of degraded and/or PCR inhibited DNA. *Journal of forensic sciences*, 53, pp. 838–852.
- Mulhern D., Ubelaker D.*, 2001. Differences in Osteon Banding Between Human and Nonhuman Bone. *Journal of forensic sciences*, vol. 46, iss. 2, pp. 220–222.
- Otoni C., Koon H.E.C., Collins M.J.*, 2009. Preservation of Ancient DNA in Thermally Damaged Archaeological Bone. *Naturwissenschaften*, vol. 96, no. 2, pp. 267–278.
- Pilli E., Vai S., Moses V.C.*, 2024. Ancient DNA challenges prevailing interpretations of the Pompeii plaster casts. *Current biology*, 34, pp. 5307–5318.
- Rees K.A., Cox M.J.*, 2010. Comparative analysis of the effects of heat on the PCR-amplification of various sized DNA fragments extracted from *Sus Scrofa* molars. *Journal of forensic sciences*, 55, pp. 410–417.
- Rogaev E.I., Grigorenko A.P., Moliaka Y.K.*, 2009. Genomic identification in the historical case of the Nicholas II royal family. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106, pp. 5258–5263.
- Rozhdestvenskikh E.V., Manakhov A.D., Andreeva T.V. et al.*, 2024. A Youth with a polecat from the Medieval Minino cemetery at the Kubenskoye Lake: Archaeogenetic identification. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii [Brief Communications of the Institute of Archaeology]*, 274, pp. 348–368. (In Russ.)
- Schubert M., Lindgreen S., Orlando L.*, 2016. AdapterRemoval v2: Rapid Adapter Trimming, Identification, and Read Merging. *BioMed Central Research Notes*, 9, 88.
- Schwark T., Heinrich A., Preusse-Prange A.*, 2011. Reliable genetic identification of burnt human remains. *Forensic science international. Genetics*, 5, pp. 393–399.
- Scorrano G., Viva S., Pinotti T.*, 2022. Bioarchaeological and palaeogenomic portrait of two Pompeians that died during the eruption of Vesuvius in 79 AD. *Scientific reports*, 12, 6468.
- Sdykov M.N., Lukpanova Ya.A.*, 2013. Rannie kochevniky Zapadnogo Kazakhstana (na primere kompleksa Taksaiy I) [Early nomads of Western Kazakhstan (the case of the Taksay I complex)]. Ural'sk: Poligrafservis. 292 p.
- Smith C.I., Chamberlain A.T., Riley M.S.*, 2003. The thermal history of human fossils and the likelihood of successful DNA amplification. *Journal of human evolution*, 45, pp. 203–217.
- Syrovatko A.S., Andreeva T.V., Kunizheva S.S. et al.*, 2024. An individual from a 12th-century mound burial on the Middle Oka: an experience of a comprehensive archaeological and genetic study. *Vestnik arkheologii, antropologii i etnografii [Vestnik Archeologii, Antropologii i Etnografii]*, 2, pp. 119–131. (In Russ.)
- Thompson T.J.*, 2004. Recent advances in the study of burned bone and their implications for forensic anthropology. *Forensic science international*, 146, pp. S203–S205.
- Tsuchimochi T., Iwasa M., Maeno Y.*, 2002. Chelating resin-based extraction of DNA from dental pulp and sex determination from incinerated teeth with Y-chromosomal aliphoid repeat and short tandem repeats. *The American journal of forensic medicine and pathology*, 23, pp. 268–271.
- Volodin S.A.*, 2018. Cremated burials of the Scythian period in the Middle Don Region. *Kratkie soobshcheniya Instituta arkheologii [Brief Communications of the Institute of Archeology]*, 250, pp. 229–242. (In Russ.)