

Изменения в спектрах комбинационного рассеяния света костной ткани как индикатор для абсолютного датирования

© Д.В. Абрамов,¹ О.В. Данилов,² В.А. Быкова,^{1,2} К.М. Станкевич,¹ К.С. Хорьков¹

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
600000 Владимир, Россия

²Государственный центр по сохранению, использованию и реставрации
объектов культуры и культурного наследия,
600000 Владимир, Россия
e-mail: awraam@mail.ru

Поступило в Редакцию 29 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 29 ноября 2025 г.

Принято к публикации 29 ноября 2025 г.

Представлены результаты анализа возможностей использования изменений в спектрах комбинационного рассеяния света костной ткани, являющихся индикаторами диагенетических превращений, для абсолютного датирования археологического материала. Исследованы образцы костей животных, собранных при археологическом изучении культурного слоя древних городов центральной части России. Эксперименты производились с использованием возбуждающего излучения видимого диапазона. Влияние фотолуминесценции хромофоров, которые присутствуют в костной ткани, уменьшалось методом фотообесцвечивания. Изучен характер изменения интенсивности основных пиков минеральной и органической составляющих костей в зависимости от величины посмертного временного материала. Показана эффективность использования полученных зависимостей в качестве хронометрического инструмента для датирования археологического остеологического материала в случае малого и среднего времени залегания в культурном слое. Произведено уточнение исторического возраста образца с выявленной ошибочной датировкой, установленной традиционным методом.

Ключевые слова: спектроскопия комбинационного рассеяния света, костная ткань, диагенез, абсолютное датирование.

DOI: 10.61011/JTF.2026.05.62758.325-25

Введение

Возможности спектроскопии комбинационного рассеяния света (КРС) по определению структурных особенностей веществ и материалов определили ее востребованность не только в фундаментальных исследованиях и при развитии промышленных технологий [1], но и для многих других приложений, включая биомедицинские исследования [2,3]. Не является исключением и сфера культурного наследия. Здесь спектроскопия КРС успешно применяется при изучении материалов, использованных при создании картин и древних рукописей [4]. Прежде всего, внимание уделяется краскам и пигментам, входящим в их состав. Пигменты также часто являются предметом исследования при изучении археологических артефактов [5,6]. Известны примеры КРС анализа археологических предметов из стекла, глины, медных сплавов и других материалов, включая органические [7–9]. Изделия из кости обойдены вниманием спектроскопистов, что оставляет нишу для отдельных научных исследований, хотя спектроскопия КРС использовалась при изучении останков древних людей и гоминидов [10,11], а также палеонтологических костей [12].

Археологические исследования являются основным методом обеспечения исторической науки материаль-

ными источниками информации о жизнедеятельности человека и развитии общества в средние века и более ранние периоды. Описание событий Нового времени (XVIII–XIX вв.) основывается в основном на сохранившихся письменных источниках и предметах культурного наследия. Но археологические артефакты часто дополняют и уточняют, а порой и опровергают существующее историческое видение этого периода. В любом случае, датирование артефактов является задачей первостепенной важности.

В археологической практике используются относительные и абсолютные методы датирования. К первым относятся стратиграфический и сравнительно-типологический методы, а также перекрестная датировка. Основанные на многолетней практике и большом объеме обработанного материала, они успешно используются археологами, но во многих случаях позволяют делать осторожные и широкие интервалы датирования. Уточнению сделанных выводов очень помогают абсолютные естественно-научные методы. Самыми хорошо развитыми среди них являются дендрохронология и радиоуглеродный анализ. Применяются также другие изотопные и термолуминесцентные подходы. Принципиально все естественно-научные методы датирования основаны на определении изменения во времени какого-

либо параметра исследуемого объекта. За время нахождения костей в погребенном состоянии в них происходят диагенетические превращения, которые, главным образом, связаны не только с разрушением органической составляющей (коллагена), но затрагивают и минеральную часть (гидроксилapatит). Эти изменения находят отражения в спектрах КРС, что позволяет использовать его для определения посмертного интервала. Абсолютное датирование на основе КРС костной ткани находится на начальной стадии развития, но уже показало интересные результаты как для оценки возраста артефактов [10–12], так и определения сохранности костей как источника материала для изотопного или ДНК анализа [13].

К сожалению, почти все работы в рассматриваемом направлении связаны с анализом отдельных наиболее выразительных артефактов, тогда как для общего использования необходима непрерывная временная зависимость целевых параметров. Известна единственная работа с представлением подобной зависимости для образцов из итальянских регионов, перекрывающая временной интервал от современности до 4000 лет до н.э. [14]. Однако для изучения отечественных археологических памятников необходим такой же инструмент, построенный на основе соответствующих исходных данных. Почвенно-климатические особенности территории нахождения костей влияют на диагенетические процессы, что препятствует осуществлению такой работы для внедрения в общероссийскую практику. Поэтому наши исследования ограничены материалом, собранным в ходе археологических раскопок в пределах Владимирской области. На начальном этапе работ были определены значения относительных интенсивностей наиболее выразительных пиков в КРС спектрах костей из строительных горизонтов, являющихся самыми мощными и уверенно идентифицированными в культурном слое древних городов выбранного региона (XII–XIV и XVII–XVIII вв.). Эти результаты, совместно с данными для современных костей, позволили установить общую тенденцию и диапазон изменений целевых параметров.

В ходе археологических раскопок полевого сезона 2025 г. были получены дополнительные образцы остеологического материала, КРС анализ которых позволил построить временные зависимости характерных относительных интенсивностей на глубину до XI в. с интервалом в одно столетие (с некоторыми лакунами), представляемые в настоящей работе. Проведенные исследования показали значительное влияние флуоресцентного фона на реализуемость выбранного подхода, и результаты работ по решению данной проблемы также отражены в представляемой статье.

1. Материалы и методы

Исследование производилось с помощью многофункционального микроскопа NTEGRA Spectra (НТ-МДТ, Зеленоград, Россия) с использованием возбуждающего ла-

зерного излучения с длиной волны 473 nm и мощностью 4 mW. Зондирующий пучок линейно поляризованного излучения твердотельного лазера LM473 фокусировался на поверхности образцов объективом Mitutoyo MPlan Apo 100 с числовой апертурой 0.7 в пятно диаметром 0.4 μm . КРС отклик от образцов регистрировался с накоплением трех проб при экспозиции в течение 10 s каждая. Выбранная частота возбуждающего излучения обеспечивает высокую доступность развиваемого метода датирования, так как часто используется в основной комплектации КРС систем, и достижение эффективности КРС в 7.6 и 25.6 раз больше, чем при использовании излучения с длиной волны 785 и 1064 nm соответственно [15]. Обработка полученных спектров, расчет относительных интенсивностей и аппроксимация их временных зависимостей выполнены с использованием программного пакета OriginPro.

В качестве образцов для анализа были выбраны фрагменты свинных костей, собранных в ходе археологических раскопок на территории исторических центров городов Владимирской области: Муром, Суздаль, Александров, которые являются известными административно-культурными центрами Северо-Восточной Руси. Наиболее древним считается первый из них. Первое летописное упоминание о нем относится к IX в. Этот фактор, а также активные полевые археологические исследования, проводящиеся здесь в настоящее время, определили предпосылки получения наиболее представительной выборки образцов на наибольшую историческую глубину. Поэтому основной массив исследованных костей, отнесенных специалистами к XIX, XVII, XIV, XII и XI векам, подобран из результатов исследований культурного слоя Мурома (раскопки 2025 г., руководитель работ — Вал.В. Бейлекчи). Имеющиеся в данной выборке временные пропуски были по возможности заполнены образцами из раскопок в Александрове (XVIII в., работы 2023 г., руководитель — О.В. Данилов) и Суздаля (XV–XVI в., работы 2008 г., руководитель — Д.А. Кабаев), остеологический материал которых находится в фондах Государственного центра по сохранению, использованию и реставрации объектов культуры и культурного наследия (г. Владимир). Для каждого обеспеченного материалом столетнего периода был выбран один образец для исследования, с поверхности которого производилась регистрация КРС спектров в трех произвольных точках.

Присутствие в выборке археологических образцов из раскопок, расположенных в разных городах, в рассматриваемом случае допустимо ввиду близких значений параметров климата и почвы. Прежде всего, отмечается влияние на диагенез костной ткани кислотности и гидрологического режима почвы [16]. Кислые грунты более агрессивны, чем щелочные. Известные значения водородного показателя почв в Муромском, Суздальском и Александровском районах Владимирской области равны 5.9, 5.5 и 5.4 соответственно, т.е. все они относятся

к слабокислым средам. Все образцы найдены в заглубленных в плотный материковый суглинок антропогенных ямах, заполненных серо-коричневым суглинком с различной степенью гумусированности. Это исключает реализацию потокового гидрологического режима, приводящего к дополнительному вымыванию минеральной составляющей костной ткани. С учетом общих для всех раскопок климатических условий со средними температурами января -8.5°C и июля $+18.8^{\circ}\text{C}$, а также среднегодовым количеством осадков 550–600 мм, можно говорить о едином гидрологическом режиме пополнения с циклическим увлажнением и высыханием, а также замораживанием и оттаиванием. Такой режим сопровождается общим усилением физического разрушения всех составляющих костной ткани, обусловленным механическими напряжениями. Таким образом, единообразие условий нахождения образцов в культурном слое позволяет не учитывать их влияние при определении временных зависимостей относительных интенсивностей характерных пиков в их КРС спектрах для выбранного историко-географического региона. Следует заметить, что термическая обработка костей (варка) изменяет начальные условия диагенеза костной ткани. Как показали наши предварительные исследования, в сваренных современных костях относительная интенсивность пиков органической составляющей становится меньше на 35 % по сравнению с сырыми образцами. В настоящей работе рассматриваются результаты анализа образцов, подобранных в приближении исключения термической кулинарной обработки (крупные кости конечностей и нижняя челюсть).

2. Результаты и обсуждение

2.1. Подавление флуоресцентного фона

Эффективность исследования биологических объектов и органических соединений часто ограничивается фоновой флуоресценцией (см., например, [17]). Сильная флуоресценция при КРС анализе костной ткани обусловлена присутствием в ней каротиноидов и гемов [15], входящих в состав крови, остатки которой сохраняются в исследуемых образцах, несмотря ни на кулинарную термическую обработку, ни на длительное нахождение в почвенных отложениях. Полоса поглощения этих хромофоров находится в синей и зеленой области спектра, а значит длина волны используемого в настоящем исследовании возбуждающего лазерного излучения находится в ее пределах. Поэтому обязательным этапом стала предварительная подготовка образцов, направленная на гашение указанной флуоресценции.

Известны разные подходы к решению проблемы флуоресценции хромофоров в костной ткани, например, длительные вакуумная сушка или экстракция каротиноидов этиловым спиртом [15], обработка 30 % раствором перекиси водорода [18] или фотообесцвечивание [19]. Два

последних наиболее привлекательны, так как требуют меньшего времени по сравнению с остальными.

В случае использования H_2O_2 , спектры КРС, пригодные для анализа состояния костной ткани, были получены уже после 40 min выдержки в растворе. При фотообесцвечивании аналогичный результат достигался при экспозиции лазерным излучением, сфокусированным $\times 100$ объективом основной измерительной головки (интенсивность $25 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$), в течение 10 min, при этом уровень шума соответствует 0.35 от начального. Однако требуемое гашение флуоресценции в этом случае достигается только для анализируемой точки, и при переходе к следующей процедура должна быть произведена заново. В результате общее время предварительной подготовки образца становится сравнимым или больше, чем при химической обработке.

В рамках общей решаемой задачи обеспечения возможности оперативного абсолютного датирования остеологического материала, собираемого в результате археологических исследований, скорость проведения исследований является очень важным фактором. Но в данном направлении не менее важным, а часто обязательным, является требование, чтобы анализ производился без разрушения или изменения структуры образцов. Особенно принципиальным это требование становится при возможном распространении развиваемого метода датирования на костяные индивидуальные находки. Исходя из этого, метод гашения флуоресценции костной ткани за счет фотообесцвечивания приобретает приоритетное значение, и его эффективность была исследована в условиях экспозиции лазерным излучением, используемым для КРС анализа.

С целью увеличения площади облучаемой поверхности образца использовалась сменная фокусирующая головка с $\times 10$ объективом. Это обеспечивало экспозицию кости лазерным пучком, сфокусированным в пятно с диаметром $40 \mu\text{m}$ (интенсивность $25 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$). В пределах этой области при использовании $\times 100$ объектива возможна регистрация КРС спектров со значительного количества точек. В качестве образцов для пошагового анализа эффективности фотообесцвечивания были использованы кости XI и XIX вв. (М-11, М-19). В наборе находок, уверенно датированных археологами, данные образцы находились в погребенном состоянии самое длительное и самое короткое время, а значит, наиболее различающиеся по величине диагенетических изменений. Обработка лазерным излучением участка костной поверхности производилась в течение 60 min. Через каждые 10 min облучения производилась контрольная регистрация спектра КРС. Зависимости относительного уровня флуоресценции A_f от времени экспозиции t_e показаны на рис. 1. В конце обработки зафиксирован уровень шума в 0.37 и 0.43 от начального для древнего и более молодого образцов соответственно. В обоих случаях это сравнимо с уровнем шума, достигнутым в ходе подготовительного облучения при использовании основной измерительной

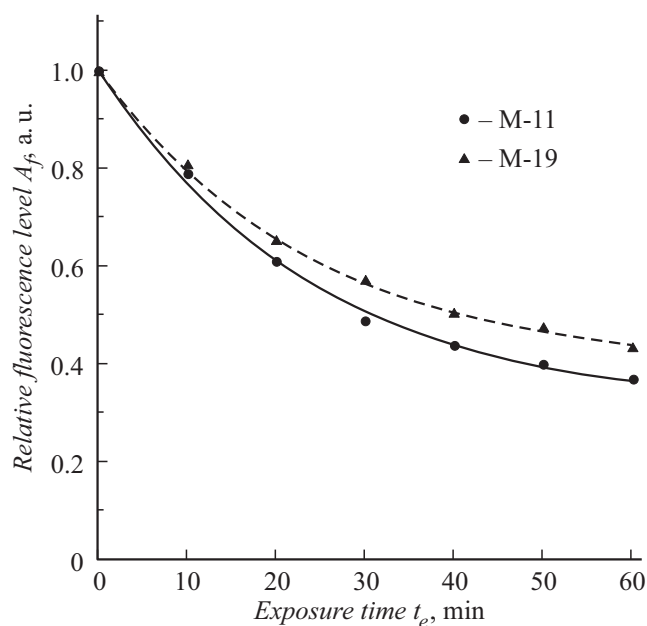


Рис. 1. Зависимости относительного уровня флуоресценции от времени экспозиции для образцов XI (сплошная линия) и XIX вв. (штриховая линия).

головки. Экспериментально полученные данные хорошо аппроксимируются экспоненциальными зависимостями вида $A_{fXI} = 0.31 + 0.7 \exp(-0.04t_e)$, $R^2 = 0.9973$ и $A_{fXIX} = 0.39 + 0.6 \exp(-0.04t_e)$, $R^2 = 0.9992$. В обоих случаях определенные зависимости показывают, что дальнейшее увеличение времени экспозиции приведет к незначительному дополнительному подавлению флуоресценции. В конце обработки образца М-19 уровень остаточной флуоресценции незначительно (на 5%) превышает результат для образца М-11, и сравнимые соотношения наблюдаются на всех этапах анализа. Это показывает возможность эффективного использования реализованного подхода к фотообесцвечиванию для археологических костей вне зависимости от времени их нахождения в погребенном состоянии.

2.2. Временные зависимости относительных интенсивностей пиков КРС спектров костной ткани

Для анализируемых образцов археологического остеологического материала спектры КРС регистрировались в диапазоне от 200 до 2000 cm^{-1} . В данной спектральной полосе (рис. 2) присутствуют три характерных пика, относительная интенсивность которых связана с изменениями в костной ткани, вызванными процессами диагенеза, а значит, перспективных для использования в качестве индикаторов для абсолютного датирования. Два из них связаны с органической составляющей костей. Во-первых, это пик около 1450 cm^{-1} , отражающий деформационные колебания метиленовых групп (CH_2) в

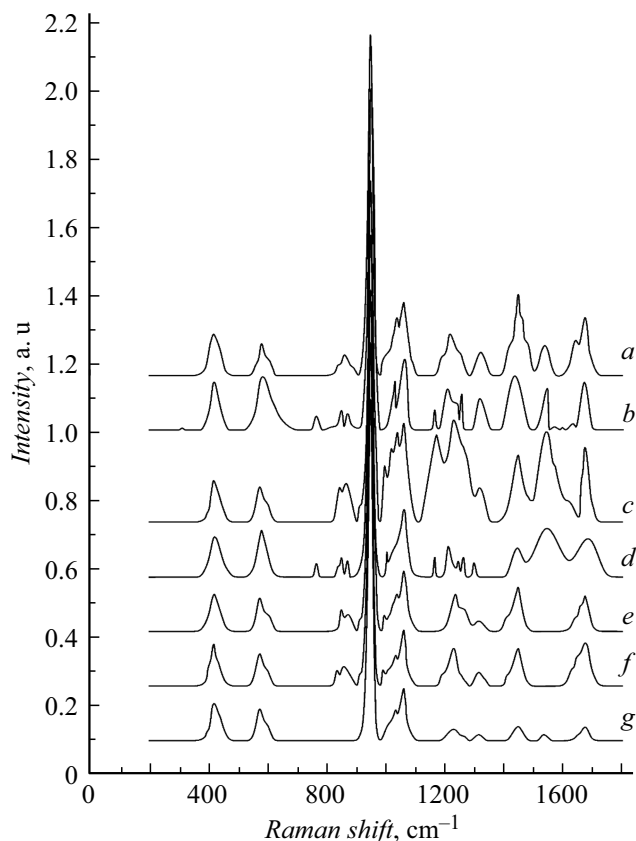


Рис. 2. Спектры археологических образцов костной ткани XIX (a), XVIII (b), XVII (c), XIV (d), XII (e), XI (f) и X вв. (g).

боковых цепях аминокислот коллагена [20]. Его интенсивность используют в качестве показателя содержания коллагена в образцах древних костей при оценке их пригодности для анализа различными методами, например, такими, как радиометрический или генетический [21]. Второй выделенный пик расположен около 1670 cm^{-1} . Он соответствует валентным колебаниям связи $\text{C}=\text{O}$ в амидной группе (полоса амид I) [22]. Одним из химических превращений, происходящих во время диагенеза костной ткани, является дезамидирование. Оно сопровождается разрушением амидных связей полипептидной цепи, а также потерей амидной функциональной группы аминокислотами, входящими в состав коллагена [23].

Третий характерный пик в спектрах КРС исследованных образцов регистрируется около 1060 cm^{-1} . Он связан с КРС откликом минеральной составляющей костной ткани (гидроксилапатита), а именно ионов карбоната кальция в его составе [24]. Относительная интенсивность данного пика также изменяется по мере увеличения посмертного временного интервала. Однако здесь основное влияние оказывают не монотонно деградиционные диагенетические превращения, как в случае органической матрицы костей, а, наоборот, увеличение кристалличности гидроксилапатита. Присутствие в его структуре карбонатов отрицательно влияет на дальний

порядок кристаллов. Эта зависимость хорошо заметна при сравнении биологического, геологического и синтетического апатита. Таким образом, высокая кристалличность минеральной фракции костной ткани связана с более низким содержанием ионов карбоната кальция [25]. Диагенез погребенных в почве костей сопровождается растворением слабоупорядоченного биоапатита, причем кристаллиты малого размера растворяются быстрее, и переосаждением на крупных кристаллитах, приводящем к их росту в более стабильной конфигурации, обедненной CO_3^{2-} [26,27]. При КРС анализе этот процесс приводит к уменьшению пиков карбонат ионов по сравнению с откликом от фосфатов.

Для определения относительных интенсивностей пиков, выбранных для решения поставленной в настоящей работе задачи, произведено нормирование их амплитудных интенсивностей на величину аналогичного параметра для пика около 950 см^{-1} , который связан с симметричными колебаниями растяжения в ионах фосфата PO_4^{3-} в гидроксипапатите. В спектрах КРС костной ткани присутствует несколько заметных пиков, соответствующих колебаниям фосфата кальция, но данный пик имеет наибольшую амплитуду.

Определенные значения относительных интенсивностей пиков около 1060 , 1450 и 1670 см^{-1} для подготовленного набора образцов археологических костей позволили построить их временные зависимости (рис. 3). Относительная интенсивность пика колебания метиленовых групп I_{1450}/I_{950} у современной кости равна 0.309 , и она уменьшается до 0.105 для образца одиннадцатого века (М-11). Последнее значение показывает, что выбранный параметр может быть уверенно использован для оценки прошедшего после смерти животного времени в пределах наиболее интересного для исследователей периода развития Северо-Восточной Руси.

Именно одиннадцатый век считается началом планомерного и интенсивного освоения этого региона русскими переселенцами. Более ранние городские культурные слои присутствуют в единичных административных центрах Владимирской области и прилегающих территорий. Несмотря на то, что Муром является именно таким городом [28,29], антропогенные отложения десятого и девятого веков редко встречаются при проведении в нем археологических раскопок, и образцы из них не присутствовали среди специально подобранного надежно датированного остеологического материала, использованного при исследованиях, результаты которых стали основой настоящей работы.

Относительная интенсивность пика около 1670 см^{-1} в полосе амид I (I_{1670}/I_{950}) изменяется от значения 0.225 у современной кости до значения 0.109 для образца М-11. Такой характер поведения рассматриваемого показателя подтверждает возможность его использования в целях абсолютного датирования одновременно или взамен I_{1450}/I_{950} . Более узкий диапазон изменения значений выявлен для относительной интенсивности I_{1060}/I_{950} . На

протяжении тысячи лет посмертного временного интервала этот показатель, характеризующий кристалличность гидроксипапатита, уменьшился от 0.238 до 0.166 . С одной стороны, это ограничивает эффективность датирования в пределах выбранного исторического периода, с другой — позволяет распространить развиваемый метод на более древние остеологические археологические находки.

На настоящем этапе работ по развитию метода абсолютного датирования на основе характеристик спектров комбинационного рассеяния света археологического остеологического материала основной задачей является построение их временных зависимостей с использованием данных, полученных при исследовании образцов костной ткани с известным временем залегания в культурном слое. Апробация результатов работ на полевом и/или камеральном материале с целью определения или уточнения его временной атрибуции предполагается при дальнейшем этапе исследований. Однако возможности развиваемого метода в данном направлении показательно проявились уже при КРС анализе образца С-15-16, входящего в исходную выборку. Данная кость найдена при археологических раскопках в Суздале в хозяйственной яме, датированной XV–XVI вв. (согласно отчету о произведенных работах [30]). Образец С-15-16 добавлен в набор материала, собранного при раскопках культурного слоя Мурома для заполнения имеющейся в нем лакуны, соответствующей указанному периоду. Определенные при КРС анализе относительные интенсивности характерных пиков в его спектре составили: $I_{1450}/I_{950} = 0.045$, $I_{1670}/I_{950} = 0.042$, $I_{1060}/I_{950} = 0.145$. Эти значения значительно меньше не только ожидаемых, но и полученных для образца одиннадцатого века.

Данный результат потребовал более тщательного изучения отчета с учетом вещевого и планиграфического контекста, окружающего исследованную находку. Выяснилось, что хозяйственная яма, в которой обнаружена кость С-15-16, перерезает другой, более древний, заглубленный в материк объект, идентифицированный как подполье наземной жилой постройки, существовавшей в древнерусское время. Опыт проведения археологических исследований позволяет утверждать, что в таких условиях часто очень затруднительно выявить точную границу между заполнениями пересекающихся ям. Таким образом, часть древнего остеологического материала была отнесена к XV–XVI вв. Следует заметить, что термин „древнерусский“ используется к определению исторического периода с IX по XII вв., и в археологической практике применяется к атрибуции материала, более точная датировка которого затруднена. Культурные отложения десятого века встречаются при археологическом изучении территории Суздаля [28,31]. Сопоставление исторических данных и результатов КРС анализа позволили отнести показатели, определенные для образца С-15-16, к посмертному временному интервалу в 11 веков.

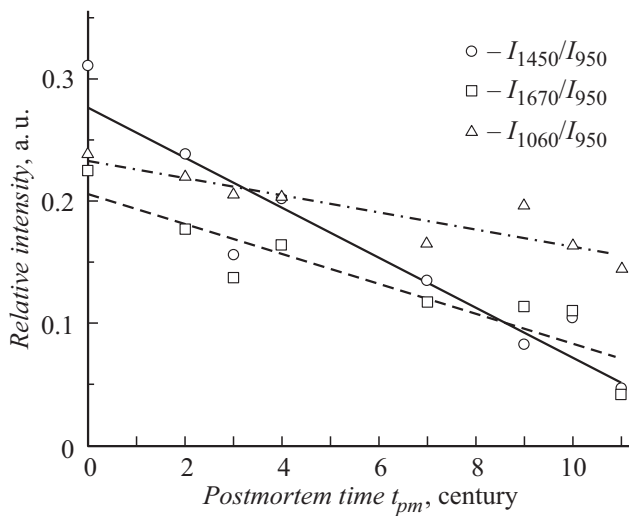


Рис. 3. Временные зависимости относительных интенсивностей характерных пиков в спектрах образцов костной ткани.

Доступный для исследования комплект образцов позволил получить дискретный набор показателей, соответствующий векам отложения остеологического материала в культурный слой. Использование результатов анализа для оценки исторического возраста любых новых находок костей животных требует непрерывных зависимостей. Поэтому была произведена аппроксимация данных для каждой из выбранных относительных интенсивностей. В работе [14] для этих целей использована экспоненциальная зависимость, что показало хорошие результаты для образцов костей с историческим возрастом до нескольких тысяч лет. Однако на начальном интервале до тысячи лет полученная кривая имеет очевидно квазилинейный участок. Образцы костной ткани, результаты анализа которых представляются в настоящей работе, имеют датировку, попадающую в этот временной интервал. Поэтому для аппроксимации полученных при их исследовании данных использовалась линейная зависимость. В результате для рассматриваемых относительных интенсивностей получены следующие выражения:

$$I_{1450}/I_{950} = 0.275 - 0.020t_{pm}, \quad R^2 = 0.8901, \quad (1)$$

$$I_{1670}/I_{950} = 0.206 - 0.012t_{pm}, \quad R^2 = 0.8370, \quad (2)$$

$$I_{1060}/I_{950} = 0.232 - 0.007t_{pm}, \quad R^2 = 0.8138, \quad (3)$$

где t_{pm} — посмертный временной интервал (в веках).

На рис. 3 аппроксимирующие зависимости показаны сплошной линией для I_{1450}/I_{950} , штриховой линией — для I_{1670}/I_{950} и штрихпунктирной линией — для I_{1060}/I_{950} . Крутизна наклона линий наглядно подтверждает выводы о том, что среди выбранных показателей в среднесрочном историческом периоде для датирования наиболее эффективно использование относительной интенсивности пика около 1450 см^{-1} , а относительная

интенсивность пика около 1060 см^{-1} позволяет распространить развиваемый метод датирования на более древние образцы костной ткани.

Заключение

Результаты проведенных работ предоставляют исследователям дополнительный инструмент для абсолютного датирования остеологического археологического материала, основанный на использовании спектроскопии КРС. Полученные эмпирические зависимости изменения относительных интенсивностей пиков, соответствующих коллагену (около 1450 и 1670 см^{-1}), могут быть использованы для оценки исторического возраста костей начиная с древнерусского периода, а пика отражающего кристалличность гидроксилатапата (около 1060 см^{-1}) — и для более ранних находок. При этом показано, что кости животных с таким посмертным временным интервалом могут успешно анализироваться с применением возбуждающего лазерного излучения видимого диапазона при выполнении предварительной процедуры фотообесцвечивания. Это значительно увеличивает доступность развиваемого подхода к естественно-научному датированию, что особенно важно при отсутствии или ограниченности вещевого и керамического материала, препятствующих традиционному типологическому датированию культурного слоя, что часто наблюдается при проведении археологических разведок и экспертиз. В таких случаях возрастает роль естественно-научных методов. Наиболее распространенными среди них в настоящее время являются дендрохронология и радиоуглеродный анализ. В сравнении с ними спектроскопия КРС имеет ряд преимуществ. Дендрохронология может применяться только при наличии среди археологического материала образцов дерева с хорошо сохранившейся поперечной структурой годовых колец. Радиоуглеродный метод является более универсальным, но стоимость экспертизы с его использованием по меньшей мере в два раза выше, чем при КРС анализе. Очевидно, что на настоящем этапе исследований абсолютная погрешность определения исторического возраста костей не может быть лучше погрешности датирования исходного археологического материала и оценивается на уровне столетия для всего рассматриваемого исторического интервала (до 1000 лет). В таких условиях развиваемый метод сравним с традиционными методами археологического датирования. Уменьшение погрешности эмпирических зависимостей возможно привлечением в исследование большего количества образцов, в том числе с историческим возрастом, более точно определяемым на основании археологического контекста (известных катастрофических событий, строительных горизонтов, нумизматического материала). Это возможно при продолжении и расширении совместных работ с практикующими археологами. Однако уже полученные результаты позволяют внедрять развиваемый метод датирования в

полевую практику и камеральную обработку собранного материала.

Благодарности

Авторы благодарят Вал.В. Бейлекчи и В.В. Бейлекчи за предоставление материала для экспериментальных образцов.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-28-01297, <https://rscf.ru/project/25-28-01297/>.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] P. Rostron, S. Gaber, D. Gaber. Intern. J. Eng. Tech. Res., **6** (1), 50 (2016).
- [2] V.V. Tuchin. J. Biomed. Photon. Eng., **2** (3), 030201 (2016). DOI: 10.18287/JBPE16.02.030201
- [3] L.A. Bratchenko, Y.A. Khristoforova, Y.G. Loginova, A.A. Moryatov, V.P. Zakharov, O.I. Kaganov, I.A. Bratchenko. J. Biomed. Photon. Eng., **11** (3), 030303 (2025). DOI: 10.18287/JBPE25.11.030303
- [4] C.G. Sarkar. Oriental J. Chem., **38** (5), 1081 (2022). DOI: 10.13005/ojc/380501
- [5] Ph. Colomban. Arts, **2**, 77 (2013). DOI: 10.3390/arts2030077
- [6] Д.В. Абрамов, О.В. Данилов. Stratum Plus, **5**, 211 (2025). DOI: 10.55086/sp255211220
- [7] L. Medeghini, P.P. Lottici, C. De Vito, S. Mignardi, D. Bersani. J. Raman Spectr., **45**, 1244 (2014). DOI: 10.1002/jrs.4583
- [8] Ph. Colomban, A. Tournié, M.C. Caggiani, C. Paris. J. Raman Spectr., **43**, 1975 (2012). DOI: 10.1002/jrs.4101
- [9] G.D. Smith, R.G.D. Clark. J. Archaeological Sci., **31**, 1137 (2004). DOI: 10.1016/j.jas.2004.02.008
- [10] H.G.M. Edwards, A.S. Wilson, N.F. Nik Hassan, A. Davidson, A. Burnett. Analytical and Bioanalytical Chem., **387**, 821 (2007). DOI: 10.1007/s00216-006-0791-9
- [11] H.G.M. Edwards, E.A. Carter, S.J. Kelloway, K.L. Privat, T.M. Harrison. J. Raman Spectr., **52** (12), 2272 (2021). DOI: 10.1002/jrs.6226
- [12] В.М. Золотарев, Г.А. Хлопачев. Опт. и спектр., **129** (6), 797 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.06.50996.1925-21
- [13] C.A.M. France, D.B. Thomas, C.R. Doney, O. Madden. J. Archaeological Sci., **42** (1), 346 (2014). DOI: 10.1016/j.jas.2013.11.020
- [14] A. Bertoluzza, P. Brasili, L. Castri, F. Facchini, C. Fagnano, A. Tinti. J. Raman Spectr., **28** (2–3), 185 (1997). DOI: 10.1002/(SICI)1097-4555(199702)28:2/3%3C185::AID-JRS69%3E3.0.CO;2-6
- [15] J.J. Freeman, M.J. Silva. Appl. Spectr., **56** (6), 770 (2002). DOI: 10.1366/000370202760077513
- [16] C. Kendall, A.M.H. Eriksen, I. Kontopoulos, M.J. Collins, G. Turner-Walker. Palaeogeography. Palaeoclimatology. Palaeoecology, **491**, 21 (2018). DOI: 10.1016/j.palaeo.2017.11.041
- [17] I.A. Matveeva, L.A. Bratchenko, O.O. Myakinin, E.N. Tupikova, V.P. Zakharov. J. Biomed. Photon. Eng., **7** (2), 020309 (2021). DOI: 10.18287/JBPE21.07.020309
- [18] G. Penel, G. Leroy, E. Bres. Appl. Spectr., **52** (2), 312 (1998). DOI: 10.1366/0003702981943428
- [19] K. Golcuk, G.S. Mandair, A.F. Callender, N. Sahar, D.H. Kohn, M.D. Morris. Biochim. Biophys. Acta, **1758**, 868 (2006). DOI: 10.1016/j.bbamem.2006.02.022
- [20] M. Gasior-Glogowska, M. Komorowska, J. Hanuza, M. Ptak, M. Kobielarz. Acta Bioengineering and Biomechanics, **12** (4), 55 (2010).
- [21] W.J. Pestle, F. Ahmad, B.J. Vesper, G.A. Cordell, M.D. Colvard. J. Archaeological Sci., **42**, 381 (2014). DOI: 10.1016/j.jas.2013.11.014
- [22] P. Vandenabeele, B. Wehling, L. Moens, H. Edwards, M. De Reu, G. Van Hooydonk. Analytica Chim. Acta, **407**, 261 (2000). DOI: 10.1016/S0003-2670(99)00827-2
- [23] M. Pal Chowdhury, R. Wogelius, P.L. Manning, L. Metz, L. Slimak, M. Buckley. Archaeometry, **61** (6), 1382 (2019). DOI: 10.1111/arc.12492
- [24] E.A. Taylor, E. Donnelly. Bone, **139**, 115490 (2020). DOI: 10.1016/j.bone.2020.115490
- [25] Z. Jurasekova, G. Fabriciova, L.F. Silveira, Y.-N. Lee, J.M. Gutak, M.M. Ataabadi, M. Kundrat. Intern. J. Molecular Sci., **23** (18), 10689 (2022). DOI: 10.3390/ijms231810689
- [26] M.J. Kohn. Geochim. Cosmochim. Acta, **72** (15), 3758 (2008). DOI: 10.1016/j.gca.2008.05.045
- [27] C.N. Trueman, K. Privat, J. Field. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, **266** (3–4), 160 (2008). DOI: 10.1016/j.palaeo.2008.03.038
- [28] Ю.А. Краснов, А.Е. Леонтьев, А.А. Михайлова, Н.Г. Самойлович, М.В. Седова. *Археологическая карта России: Владимирская область* (Институт археологии РАН, М., 1995)
- [29] И.П. Богатов. Советская археология, **3**, 223 (1959).
- [30] Д.А. Кабаев. *Отчет о раскопках в г. Суздаль в 2008 г. (Раскоп 1 по ул. Слободская, 47–49)* (ГУК „Госцентр“, Владимир, 2009)
- [31] А.Н. Федорина, Н.А. Макаров, С.И. Милованов, Н.А. Баранов. В сб.: *Археология Суздальской земли. Т. 2. Культура, общество, идентичность*, под ред. Н.А. Макарова (Древности Севера, М., Вологда, 2023), с. 231.