

doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-717-723

УДК 539.143.43

Релаксация ядерного магнитного резонанса протонов и исследование пористости балтийского янтаря

Ирина Павловна Корнева¹✉, Николай Яковлевич Синявский²,
Наталья Анатольевна Кострикова³

^{1,2,3} Калининградский государственный технический университет, Калининград, 236022, Российская Федерация

¹ ipk05@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6523-724X>

² nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>

³ natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>

Аннотация

Введение. Балтийский янтарь обладает особыми оптическими свойствами и прозрачностью, вследствие чего он считается одним из наиболее ценных материалов. Анализ структурных особенностей позволяет оценить чистоту и аутентичность янтаря. Исследование направлено на понимание фундаментальных процессов внутри полимерной матрицы янтаря. Разработка новых, более надежных критериев для аутентификации и классификации янтаря, фундаментальное понимание связи между молекулярной динамикой и макроскопическими свойствами природных полимеров является актуальным. В работе приводятся результаты исследования молекулярной динамики в янтаре и взаимодействия его с водой. **Метод.** В настоящее время отсутствуют опубликованные значения времен релаксации T_1 и T_2 ядерного магнитного резонанса в янтаре, который представляет собой сложный аморфный природный полимер с различным составом и структурой. Целью работы явилась систематизация существующих научных работ по применению метода ядерного магнитного резонанса к образцам янтаря, выявление пробелов в текущих знаниях и обоснование актуальности новых, более сложных методик, таких как 2D T_1 – T_2 релаксометрия ядерного магнитного резонанса, для исследования сложной структуры полимера. Выполнен анализ связей релаксационных характеристик с пористостью и степенью насыщенности водой янтаря. Использование метода 2D T_1 – T_2 релаксометрии позволило перейти от феноменологического описания к механистическому пониманию структуры и свойств янтаря на молекулярном уровне. **Основные результаты.** Установлено, что в янтаре имеется два вида пор, размеры которых отличаются на два порядка. Показано, что обработка водой приводит к появлению новых компонентов с отличной от исходной матрицы динамикой, что интерпретируется как заполнение водой микропор и изменение гибкости полимерных цепей. **Обсуждение.** Информация о порах представляет интерес с точки зрения технологии обработки янтаря, так как размеры пор определяют его хрупкость и способность к растрескиванию. В работе установлена корреляция между временами релаксации и степенью насыщенности водой балтийского янтаря. Плавленный янтарь имеет более короткие времена T_2 , что, по-видимому, связано со снижением молекулярной подвижности из-за образования дополнительных поперечных связей в полимерной матрице. Время T_1 , напротив, может демонстрировать более сложное поведение, связанное с эффективностью кросс-релаксации. Метод позволяет селективно идентифицировать компоненты: разделить сигналы от жесткой полимерной сети (длинное T_1 , короткое T_2 — высокое отношение T_1/T_2), подвижных молекулярных фрагментов (умеренные T_1 и T_2) и возможных включений жидкости (короткое T_1 , длинное T_2 — низкое отношение T_1/T_2). Внедрение метода 2D T_1 – T_2 релаксометрии является актуальным и перспективным направлением исследования структуры и свойств сложных полимеров.

Ключевые слова

янтарь, времена релаксации ЯМР, пористая структура, распределение размеров пор, гидротермальная обработка, молекулярная динамика

Ссылка для цитирования: Корнева И.П., Синявский Н.Я., Кострикова Н.А. Релаксация ядерного магнитного резонанса протонов и исследование пористости балтийского янтаря // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2026. Т. 26, № 4. С. 717–723. doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-717-723

© Корнева И.П., Синявский Н.Я., Кострикова Н.А., 2026

NMR proton relaxation and porosity study of Baltic amber

Irina P. Korneva¹✉, Nikolaj Ya. Sinyavsky², Nataliya A. Kostrikova³^{1,2,3} Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, 236022, Russian Federation¹ ipk05@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-6523-724X>² nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>³ natalia.kostrikova@klgtu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>**Abstract**

Baltic amber possesses exceptional optical properties and transparency, making it considered one of the most valuable materials. Analysis of its structural features allows one to assess the purity and authenticity of amber. This study aims to understand the fundamental processes within the amber polymer matrix. The development of new, more reliable criteria for amber authentication and classification, as well as a fundamental understanding of the relationship between molecular dynamics and the macroscopic properties of natural polymers, is relevant. This paper presents the results of a study of molecular dynamics in amber and its interaction with water. Currently, there are no published values for the T_1 and T_2 nuclear magnetic resonance (NMR) relaxation times in amber which is a complex amorphous natural polymer with variable composition and structure. The aim of this study was to systematize existing scientific papers on the application of nuclear magnetic resonance to amber samples, identify gaps in current knowledge, and substantiate the relevance of new, more sophisticated techniques, such as 2D T_1 - T_2 NMR relaxometry, for studying the complex structure of the polymer. An analysis of the relationships between relaxation characteristics, porosity, and water saturation of amber was conducted. The use of 2D T_1 - T_2 relaxometry method enabled a transition from a phenomenological description to a mechanistic understanding of the structure and properties of amber at the molecular level. It has been established that there are two types of pores in amber, the sizes of which differ by two orders of magnitude. It is shown that water treatment leads to the appearance of new components with dynamics different from the original matrix, which is interpreted as the filling of micropores with water and a change in the flexibility of polymer chains. Information about the pores is of interest from the point of view of amber processing technology, since the size of the pores determines its fragility and cracking ability. The work established a correlation between relaxation times and the degree of saturation of Baltic amber with water. Fused amber has shorter T_2 times, which is probably due to a decrease in molecular mobility due to the formation of additional cross-links in the polymer matrix. Conversely, the T_1 time may exhibit more complex behavior related to the efficiency of cross-relaxation. The method enables selective identification of components: separating signals from a rigid polymer network (long T_1 , short T_2 — high T_1/T_2 ratio), mobile molecular fragments (moderate T_1 and T_2), and possible liquid inclusions (short T_1 , long T_2 — low T_1/T_2 ratio). The implementation of 2D T_1 - T_2 relaxometry method is a relevant and promising direction in studying the structure and properties of complex polymers.

Keywords

amber, NMR relaxation times, porous structure, pore size distribution, hydrothermal treatment, molecular dynamics

For citation: Korneva I.P., Sinyavsky N.Ya., Kostrikova N.A. NMR proton relaxation and porosity study of Baltic amber. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2026, vol. 26, no. 4, pp. 717–723 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2026-26-4-717-723

Введение

Исследование внутренней структуры янтаря играет ключевую роль в понимании процессов его образования и изучении свойств. Анализ структурных особенностей позволяет выявить механизмы полимеризации смолы хвойных деревьев, сохранившейся в течение миллионов лет. Изучение внутренних дефектов и пузырьков воздуха дает представление о составе атмосферы древнего периода. Кроме того, знание микроструктуры янтаря полезно для разработки методов диагностики подлинности драгоценных камней и идентификации его месторождения [1, 2].

Балтийский янтарь занимает особое место среди всех видов янтаря, встречающихся в мире. Название «сукцинит» произошло от латинского слова «succinum», означающего «янтарь». Термин «сукцинит» подчеркивает особый химический состав и физические свойства балтийского янтаря, которые выделяют его среди других разновидностей.

Балтийский янтарь обладает особыми оптическими свойствами и прозрачностью, поэтому он считается одним из наиболее ценных материалов для ювелирных изделий [3]. Кроме того, именно в балтийском янтаре

содержится наибольшее количество инклюзов — окаменевших останков животных и растений, что представляет особую ценность для науки.

Основными компонентами янтаря являются углерод (около 79 %), кислород (около 10,5 %), водород (около 10,5 %). Кроме того, в составе янтаря присутствуют органические кислоты (янтарная кислота, жирные кислоты, смоляные кислоты) и ароматические компоненты.

Янтарь отличается отсутствием упорядоченной кристаллической структуры, что характерно для большинства смол. Его сложная химическая организация определяется супрамолекулярной структурой, где молекулы соединены слабым межмолекулярным взаимодействием, образуя пространственно организованную систему [3]. Данная структура обеспечивает уникальные механические и оптические свойства янтаря, такие как эластичность и способность сохранять включения. Несмотря на отсутствие строгого порядка атомов, янтарь демонстрирует высокую устойчивость к внешним воздействиям, что делает его уникальным природным материалом с широким спектром применений.

Структура янтаря достаточно хорошо изучена современными методами анализа. Важную роль играют

входящие в структуру янтаря природные добавки, такие как минеральные примеси и микроскопические включения, влияющие на его оптические и химические характеристики. Однако многие аспекты внутреннего строения янтаря остаются предметом дальнейших исследований.

Обзор методов исследования

Для исследования структуры и свойств янтаря используются современные физико-химические методы, такие как инфракрасная спектроскопия (ИК-спектроскопия), рамановская спектроскопия, рентгеновская дифракция, хроматография и масс-спектрометрия и др.

В работе [4] проведено исследование спектров флуоресценции балтийского янтаря разной степени прозрачности. Установлено, что менее прозрачные экземпляры обладают меньшей интенсивностью свечения. Демонстрируется, что разрушение янтаря позволяет обнаружить скрытые и поверхностные повреждения, оценить уровень прозрачности и распределение непрозрачных зон в необработанном сырье и готовых изделиях.

Другие оптические и спектроскопические методы часто используются для исследования янтаря. Так, в работе [5] образцы балтийского янтаря были подвергнуты исследованию с применением методик колориметрии, поляриметрии и релаксометрии ядерного магнитного резонанса (ЯМР).

ИК-спектроскопия позволяет определить качественные и количественные характеристики компонентов янтаря, а также особенности его химической структуры. Например, с помощью ИК-спектроскопии были определены взаимосвязи между полимеризацией, связанной со структурой и составом различных типов природных смол, [6], а также рассмотрены методы идентификации балтийского янтаря [3, 7–10].

Рамановская спектроскопия используется для детального изучения состава и распределения отдельных элементов в материале. В работе [11] представлен метод распознавания сукцинита посредством анализа комбинационного рассеяния света. Этот метод позволяет определить химический состав материала и выявить присутствие включений.

Рентгеновская дифракция применяется для выявления аморфной природы вещества и оценки степени его полимеризации. Хроматографические и масс-спектрометрические методы дают возможность точно установить качественный и количественный состав янтаря, включая содержание различных классов органических соединений. Совокупность этих методов обеспечивает комплексный подход к изучению янтаря, позволяя получать точные и надежные данные о его строении и происхождении.

Метод ЯМР представляет собой мощный инструмент исследования химического состава вещества и структуры молекул янтаря [12–14]. Детальные спектры ЯМР позволяют получать информацию о химическом составе янтаря и происхождении материала.

Изучение спектров ЯМР может использоваться для оценки степени старения янтаря путем анализа изме-

нений в составе соединений, вызванных воздействием окружающей среды и временем. Данный метод обеспечивает обнаружение наличия посторонних элементов внутри образца, помогая оценить чистоту и аутентичность янтаря. Исследования с применением ЯМР определяют источник происхождения янтаря, сравнивая полученные спектры с эталонными образцами известных месторождений.

Разработка новых, более надежных критериев для аутентификации и классификации янтаря, фундаментальное понимание связи между молекулярной динамикой и макроскопическими свойствами природных полимеров являются актуальными.

В настоящее время отсутствуют доступные опубликованные значения времен спин-решеточной релаксации T_1 и спин-спиновой релаксации T_2 ЯМР в янтаре, предположительно потому, что янтарь представляет собой сложный аморфный природный полимер с различным составом и структурой, и его времена релаксации T_1 и T_2 практически не изучались. Однако для любого конкретного образца янтаря значения T_1 и T_2 зависят от таких факторов, как его молекулярная структура, наличие примесей или парамагнитных ионов, а также от условий эксперимента, таких как напряженность магнитного поля и температура. Отметим факторы, влияющие на времена релаксации T_1 и T_2 в янтаре: молекулярная подвижность, парамагнитные примеси, композиционные вариации, условия эксперимента.

Измеренные значения T_1 и T_2 дают представление о молекулярной динамике и механизмах релаксации данного конкретного образца янтаря. Время T_1 отражает, как спины обмениваются энергией с «решеткой» (окружающими молекулами, колебаниями). T_1 чувствительно к медленным движениям (динамике сегментов). Время T_2 демонстрирует декогеренцию спинов из-за локальных магнитных полей. T_2 чувствительно к быстрым и средним движениям, локальным гетерогенностям, подвижности.

Цель работы — систематизация существующих научных работ по применению метода ЯМР к образцам янтаря, выявление пробелов в текущих знаниях и обоснование актуальности новых, более сложных методик, таких как 2D T_1 – T_2 ЯМР-релаксометрия, для решения дискуссионных аспектов. Задача включает также анализ связей релаксационных характеристик с пористостью и степенью насыщенности водой янтаря.

Методика проведения исследования и его основные результаты

Для измерений времен релаксации использовался ЯМР-релаксометр PQ001 (Suzhou Niumag Analytical Instrument Corporation, Китай) с магнитом 0,5 Тл (частота для протонов 21 МГц). Диаметр пробирки для образца 25 мм, высота образца в пробирке 20 мм. Применялось программное обеспечение релаксометра NMR Analyzing System Ver 4.0 и программа Q-CPMG. Инверсия спада сигнала намагниченности выполнялась с помощью алгоритма Simultaneous Iterative Reconstructive Technique. Для инверсии T_2 при определении распределения размеров пор в янтаре использо-

вался метод Butler–Reeds–Dawson с соответствующим параметром регуляризации α . Все эксперименты выполнялись при температуре 32 °С (температура стабилизации магнитного поля ЯМР-релаксометра).

Исследовано три типа образцов янтаря из Приморского месторождения вблизи поселка Янтарный Калининградской области. Использовались образцы 1–2 см³ массой 1–2 г. Два типа образцов янтаря представляли собой прозрачные камни желтого и красного оттенков, тогда как образец третьего типа был непрозрачным и имел серую окраску. Все образцы не имели значительных включений. Для насыщения водой образцы предварительно помещались в этанол на сутки для заполнения пор этанолом. После этого образцы выдерживались в воде на протяжении суток для замещения этанола водой. Сушка образцов производилась в сушильном шкафу при температуре 30 °С в течение суток. Все измерения повторялись трехкратно, при этом фиксировалась хорошая воспроизводимость полученных результатов.

На рис. 1 приведены распределения времен релаксаций T_1 и T_2 для нескольких видов янтаря и близких к нему веществ.

Из рис. 1 видно, что значения времен релаксации исследованных образцов близки друг к другу. Отношение T_1/T_2 для всех проб янтаря большое (более 1000), что характерно для твердых полимеров. Оно указывает на очень жесткую структуру, малоподвижные сегменты, ограниченную динамику (низкая подвижность). Спины медленно отдают энергию решетке, но быстро теряют когерентность из-за сильных локальных неоднородностей.

Распределение времен продольной релаксации янтарной кислоты имеет один узкий пик $T_1 = 35$ мс. Распределение времен поперечной релаксации T_2 представлено двумя пиками $T_2 = 0,04$ и 4,0 мс. Эти два времени релаксации относятся к ядрам водорода в OH- и CH₂-группах соответственно. Эти группы в молекуле

HOOC–CH₂–CH₂–COOH имеют разную подвижность. В янтаре содержится от 2 % до 8 % янтарной кислоты, поэтому ее времена релаксации дают незначительный вклад в распределение времен T_1 и T_2 .

Янтарь гигроскопичен, но динамическое состояние адсорбированной воды и ее взаимодействие с полимерной сеткой не охарактеризованы методами ЯМР-релаксометрии.

Ключевым параметром при определении размера пор в твердом теле с использованием явления ЯМР T_2 является поверхностная релаксационность. Поверхностная релаксационность рассматривается не только в твердых пористых матрицах, например, в работе [15] была определена релаксационность в водной эмульсии дизельного топлива.

Теория ЯМР пористых сред [16] показывает, что время поперечной релаксации T_2 жидкости, содержащейся в твердой матрице, позволяет оценить размеры пор:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2s}} = \rho S_p = \rho \frac{F_s}{r}, \quad (1)$$

где T_{2s} — поверхностное поперечное время релаксации; S_p — удельная площадь поверхности по отношению к объему пор, мкм⁻¹; ρ — поперечная поверхностная релаксационность, мкм/с; r — размер пор. Формула (1) получается в предположении, что T_{2b} (время релаксации в свободной жидкости) оказывается значительно больше T_{2s} , и что диффузия в жидкости происходит быстро. Удельная площадь поверхности по отношению к объему пор связана с размером пор (r) и фактором формы пор F_s . Предположим, что поры имеют сферическую форму, и F_s эквивалентен 3.

Используем формулу (1) в виде:

$$\frac{1}{T_2} = \rho \frac{S}{V}, \quad (2)$$

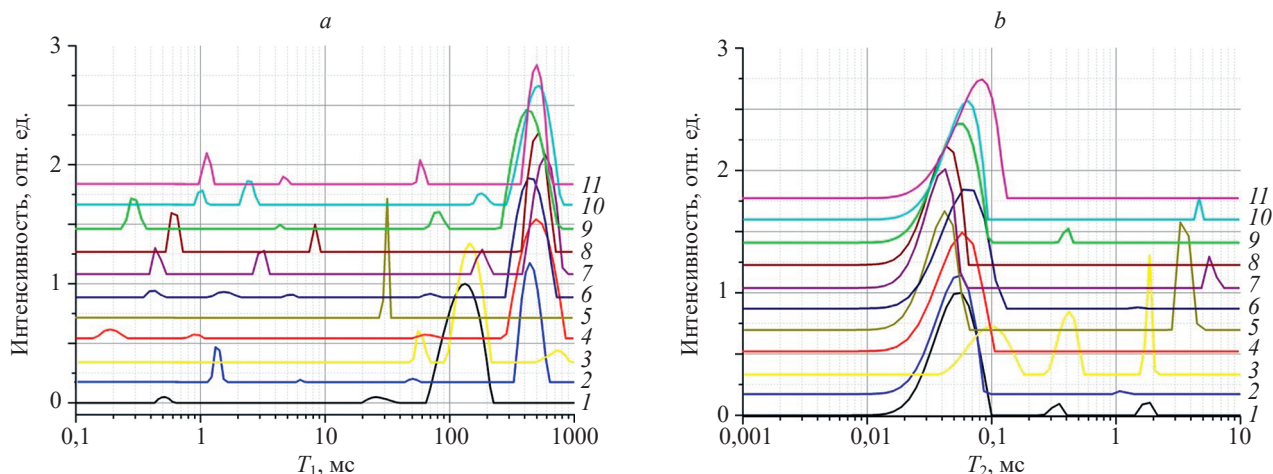


Рис. 1. Распределения времен релаксаций T_1 (a) и T_2 (b):

1 и 2 — эпоксидные смолы белая и красная; 3 — смола ели; 4 — канифоль; 5 — янтарная кислота; 6 — янтарь в красной эпоксидной смоле; 7 — янтарь плавильный с включениями; 8 — янтарь плавильный; 9 — янтарь белый; 10 — янтарь красный; 11 — янтарь серый

Fig. 1. Distributions of relaxation times T_1 (a) and T_2 (b):

1 and 2 are epoxy resins white and red; 3 is spruce resin; 4 is rosin; 5 is succinic acid; 6 is amber in red epoxy resin; 7 is fused amber with inclusions; 8 is fused amber; 9 is white amber; 10 is red amber; 11 is gray amber

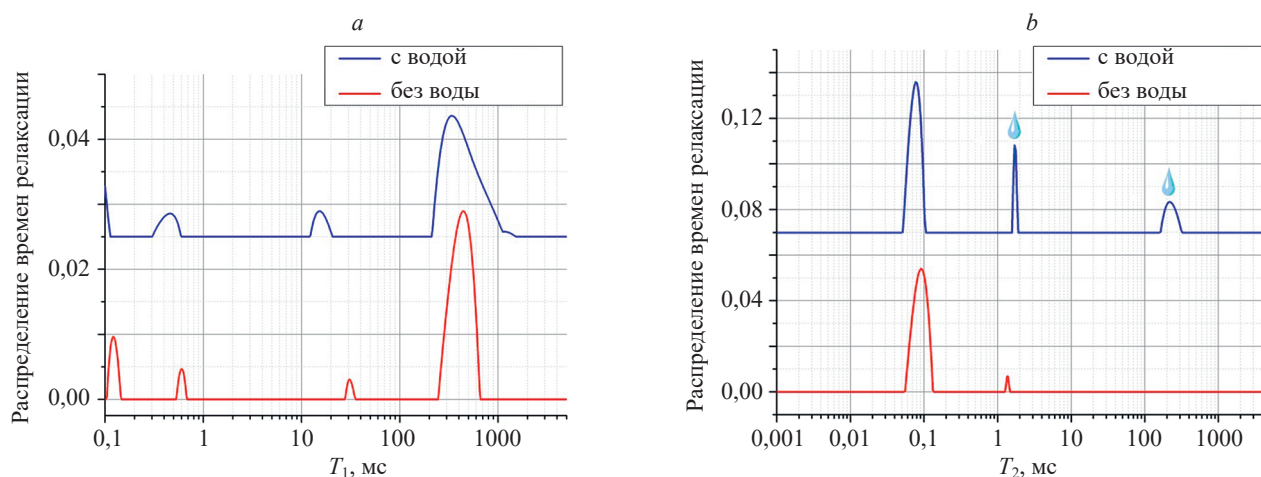


Рис. 2. Распределение времен релаксаций T_1 (a) и T_2 (b) в сухом янтаре и в янтаре с порами, заполненными морской водой
Fig. 2. Distribution of T_1 (a) and T_2 (b) relaxation times in dry amber and in amber with pores filled with seawater

где S — площадь поверхности пор; V — объем воды в полости.

Из формулы (2) можно определить поверхностную релаксационность ρ протонов на границе раздела вода/янтаре, если S и V известны. Данные о поверхностной релаксационности для раздела сред вода/янтаре в научных работах отсутствуют и для расчетов распределения эффективных радиусов пор в настоящей работе использовано значение $\rho = 49$ мкм/с, известное для стекла.

Для определения поверхностной релаксационности на границе раздела вода/янтаре необходимо специальное исследование. Значение ρ для янтара может отличаться от величины 49 мкм/с, а значит и абсолютные значения радиусов пор могут отличаться от реальных. Однако на характер распределения пор по размерам это не влияет, а полученные абсолютные значения размеров пор можно считать оценочными.

На рис. 2 показаны распределения времен релаксации ЯМР для сухого янтара и янтара с адсорбированной морской водой. В отличие от распределения времен T_1 , где янтаре с порами, заполненными водой, практически дает такое же распределение, что и сухой янтаре (рис. 2, a), в распределениях времен T_2 для сухого и насыщенного водой янтара (рис. 2, b), наблюдаются существенные различия. Появляется широкий пик воды при 220 мс и интенсивный узкий пик при 2 мс. Этот последний пик слабо наблюдается и у сухого янтара, можно предположить, что в мелких порах в глубине образца остается небольшое количество воды даже у сухого янтара.

На рис. 3 показано распределение по размерам пор в янтаре, полученное с помощью распределения T_2 для воды в порах янтара и программы Niumag NMR Data Analysis Software V1.1. Используя распределения времен спин-спиновой релаксации T_2 воды в порах, были рассчитаны распределения эффективных радиусов пор для разных проб янтара (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что в янтаре имеется два вида пор: поры размером 2 мкм, имеющие узкий пик распределения и почти одинаковый у разных образцов. Второй вид пор имеет широкий пик, и размеры существенно различаются для разных образцов янтара (180–450 мкм).

Пористость янтара для образцов на рис. 3 составляла 5,4 %, 5,0 % и 1,4 % и влияла только на интенсивность пиков.

Исследование с помощью распределения времен релаксации ЯМР плавленого янтара, насыщенного водой (рис. 4), показало, что в этом янтаре большие поры отсутствуют, а имеются только малые поры с размером около 2 мкм.

Для установления корреляции между временами релаксаций T_1 и T_2 , выполнен двумерный эксперимент, позволяющий показать соотношение между разными группами спинов в образце янтара (рис. 5).

Проекции карты рис. 5 на оси дают одномерные распределения времен релаксаций. 2D-спектр определяет, какие пики относятся к одним и тем же молекулярным группам. Пик с наибольшим временем T_1 и минимальным временем T_2 относится к твердой матрице янтара. Пики, соответствующие большим временам релаксации T_2 , принадлежат воде, находящейся в порах янтара.

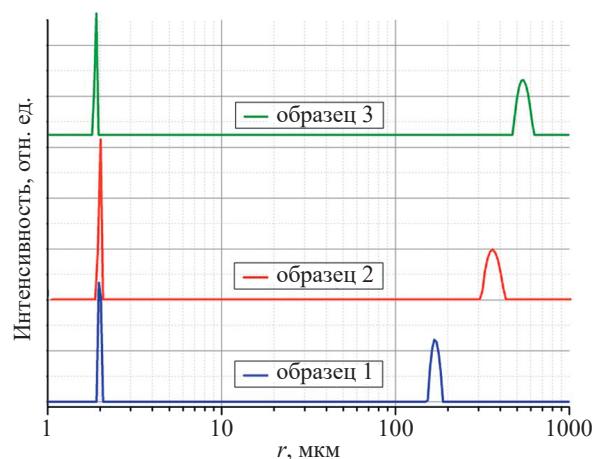


Рис. 3. Распределение пор по размерам для трех образцов янтара. Размеры пор: 1,9 мкм, 148,9 мкм (образец 1); 1,9 мкм, 297,6 мкм (образец 2); 1,8 мкм, 545,6 мкм (образец 3)

Fig. 3. Pore size distribution for three different amber samples. Pore sizes: 1.9 μm , 148.9 μm (sample 1); 1.9 μm , 297.6 μm (sample 2); 1.8 μm , 545.6 μm (sample 3)

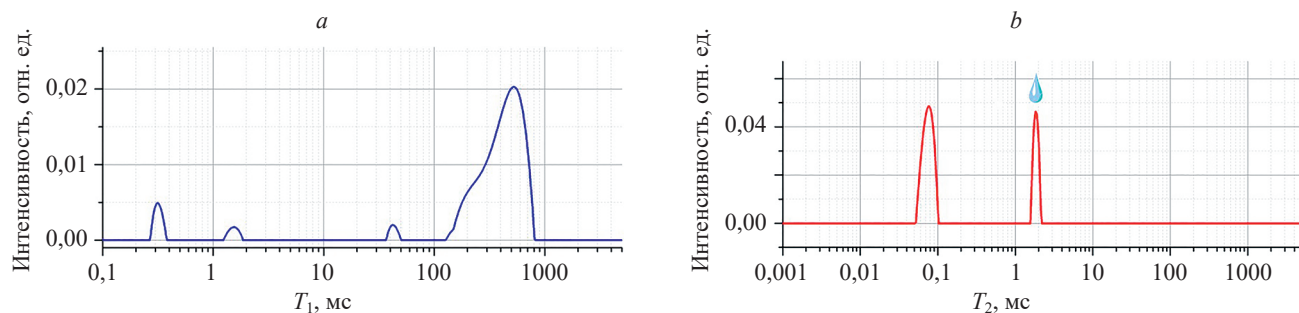


Рис. 4. Распределения времен релаксаций T_1 (a) и T_2 (b) для плавленого янтаря, выдержанного в воде

Fig. 4. Distributions of relaxation times T_1 (a) and T_2 (b) for fused amber kept in water

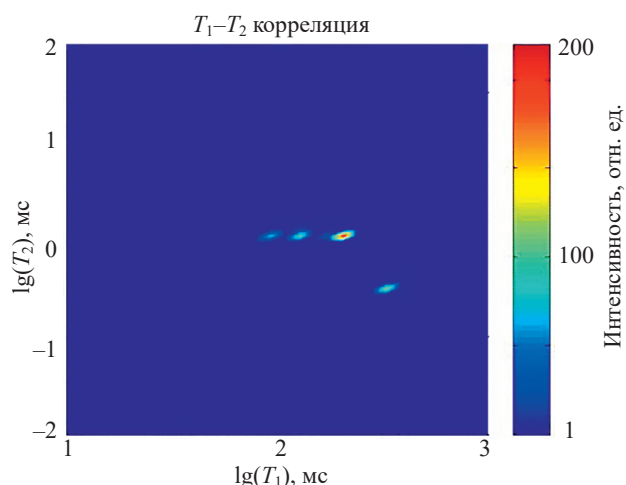


Рис. 5. T_1 – T_2 корреляция для плавленого янтаря с водой в порах

Fig. 5. T_1 – T_2 correlation for fused amber with water in pores

Закключение

Неразрушающий и неинвазивный метод релаксометрии ядерного магнитного резонанса, в частности, измерение времен спин-решеточной (T_1) и спин-спиновой (T_2) релаксаций, является мощным инструментом для изучения динамики молекул и морфологии порового пространства в таких гетерогенных системах как янтарь.

В работе установлена корреляция между временами релаксации и степенью насыщенности водой

балтийского янтаря. Показано, что плавленый янтарь демонстрирует более короткие времена T_2 , что предположительно объясняется снижением молекулярной подвижности из-за усиления поперечных связей в полимерной матрице. Время T_1 , напротив, может демонстрировать более сложное поведение, связанное с эффективностью кросс-релаксации.

Настоящая работа является одной из немногих работ, где 2D T_1 – T_2 метод применен к янтарю. Наглядно показано, как гидрообработка приводит к появлению новых компонентов с отличной от исходной матрицы динамикой, что может свидетельствовать о заполнении водой микропор и изменении гибкости полимерных цепей. Метод позволяет селективно идентифицировать компоненты: разделить сигналы от жесткой полимерной сети (длинное T_1 , короткое T_2 — высокое отношение T_1/T_2), подвижных молекулярных фрагментов (умеренные T_1 и T_2) и возможных включений жидкости (короткое T_1 , длинное T_2 — низкое отношение T_1/T_2). Внедрение 2D T_1 – T_2 релаксометрии является актуальным и перспективным направлением, которое позволит перейти от феноменологического описания к механистическому пониманию структуры и свойств янтаря на молекулярном уровне.

Янтарь имеет низкую твердость (2–2,5 по шкале Мооса), высокую хрупкость и низкую температуру плавления (150–180 °C). Знание структуры пор в янтаре важно для выбора оптимальной технологии его обработки.

Литература

1. Костяшова З.В. Принципы и системы коммерческой классификации янтаря с древнейших времен до современности // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2024. № 4. С. 56–71. doi: 10.5922/vestniknat-2024-4-4
2. Богдасаров М.А., Богдасаров А.А. Систематика ископаемых смол: диагностические признаки и классификационное положение сукцинита // Международный научный симпозиум «Добыча и обработка янтаря на Самбии». 2011. С. 15–20.
3. Матушевская А. Натуральные и искусственные смолы — некоторые аспекты структуры и свойств // Международная научно-практическая конференция «Янтарь и его имитации». 2013. С. 7–23.
4. Верховская Я.И., Прокопенко В.Т. Дефектоскопия балтийского янтаря: оптический анализ макро- и микроструктуры // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и

References

1. Kostyashova Z.V. Principles and systems for commercial classification of amber from ancient times to the present day. Vestnik IKBFU. *Natural and Medical Sciences*, 2024, no. 4, pp. 56–71. (in Russian). doi: 10.5922/vestniknat-2024-4-4
2. Bogdasarov M.A., Bogdasarov A.A. The classification of fossil resins: the diagnostic features and the classification position of succinite. *Proc. of the International Scientific Symposium "Amber mining and processing in Sambia"*, 2011, pp. 15–20. (in Russian)
3. Matuszewska A. Natural and artificial resins — chosen aspects of structure and properties. *Proc. of the International Scientific and Practical Conference "Amber and Its Imitations"*, 2013, pp. 7–23 (in Russian).
4. Verkhovskaia I.A., Prokopenko V.T. Nondestructive testing of Baltic amber: optical analysis of macro- and microstructure. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 335–345. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-335-345

- оптики. 2020. Т. 20. № 3. С. 335–345. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-335-345
5. Корнева И.П., Кострикова Н.А., Синявский Н.Я. Исследование Балтийского янтаря методами колориметрии, поляриметрии и релаксометрии ЯМР // V международный Балтийский морской форум. 2017. С. 503–507.
 6. GarciaValles M., Di Mariano A., Alfonso P., Nogues J., Martinez S. Differentiation between copal and amber by their structure and thermal behaviour // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. V. 148. N 23. P. 13027–13037. doi: 10.1007/s10973-023-12333-8
 7. Beck C., Wilbur E., Meret S., Kossove D., Kermani K. The Infrared spectra of amber and the identification of Baltic amber // *Archaeometry*. 1965. V. 8. N 1. P. 96–109. doi: 10.1111/j.1475-4754.1965.tb00896.x
 8. Зюбин А.Ю., Кундалевич А.А., Зозуля А.С., Богдасаров М.А., Демискевич Е.А., Самусев И.Г. От триасового периода к современности: спектроскопия комбинационного рассеяния света для дифференциации ископаемых смол различного возраста // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24. № 6. С. 880–891. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-880-891
 9. Воротников Б.Ю., Булычев А.Г., Карстен О.И., Ежевская Т.Б. Исследование разновидностей янтаря на ИК-фурье-спектрометре ФТ-801 методом НПВО // Лаборатория и производство. 2019. № 2 (6). С. 105–109. doi: 10.32757/2619-0923.2019.2.6.104v.109
 10. Воротников Б.Ю., Булычев А.Г., Марковцева Ю.С., Сыркина А.А. Коллекция спектров ископаемых смол на примере Балтийского янтаря, практика применения // XII Международный Балтийский морской форум. 2024. С. 270–278.
 11. Верховская Я.И., Прокопенко В.Т. Идентификация янтаря по спектрам комбинационного рассеяния // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 2. С. 193–199. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-193-199
 12. Lambert J.B., Santiago-Blay J.A., Wu Y., Levy A.J. Examination of amber and related materials by NMR spectroscopy // *Magnetic Resonance in Chemistry*. 2015. V. 53. N 1. P. 2–8. doi: 10.1002/mrc.4121
 13. Lambert J.B., Poinar G.O. Amber: the Organic Gemstone // *Accounts of Chemical Research*. 2002. V. 35. N 8. P. 628–636. doi: 10.1021/ar0001970
 14. Dal Corso J., Roghi G., Ragazzi E., Angelini I., Giaretta A., Soriano C., et al. Physico-chemical analysis of Albion (Lower Cretaceous) amber from San just (Spain): Implications for palaeoenvironmental and palaeoecological studies // *Geologica Acta*. 2013. V. 11. N 3. P. 359–370. doi: 10.1344/105.000001871
 15. Sinyavsky N., Synashenko O., Kostrikova N. NMR Relaxometry study of demulsification of diesel fuel // *Applied Magnetic Resonance*. 2026. V. 57. N 1. P. 2. doi: 10.1007/s00723-025-01820-w
 16. Slijkerman W.F., Hofman J.P. Determination of surface relaxivity from NMR diffusion measurements // *Magnetic Resonance Imaging*. 1998. V. 16. N 5-6. P. 541–544. doi: 10.1016/s0730-725x(98)00058-7
 5. Korneva I.P., Kostrikova N.A., Sinyavsky N.Ya. Baltic amber study by the colorimetry, polarimetry and NMR relaxometry methods. *Proc. of the 5th International Baltic Maritime Forum*, 2017. pp. 503–507. (in Russian)
 6. GarciaValles M., Di Mariano A., Alfonso P., Nogues J., Martinez S. Differentiation between copal and amber by their structure and thermal behaviour. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, vol. 148, no. 23, pp. 13027–13037. doi: 10.1007/s10973-023-12333-8
 7. Beck C., Wilbur E., Meret S., Kossove D., Kermani K. The Infrared spectra of amber and the identification of Baltic amber. *Archaeometry*, 1965, vol. 8, no. 1, pp. 96–109. doi: 10.1111/j.1475-4754.1965.tb00896.x
 8. Zyubin A.Yu., Kundalevich A.A., Zozulya A.S., Bahdasarau M.A., Demishkevich E.A., Samusev I.G. From Triassic to modernity: Raman spectroscopy for differentiation of fossil resins age by age. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 6, pp. 880–891. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-6-880-891
 9. Vorotnikov B.Yu., Bulychhev A.G., Markovtseva Yu.S., Syrkina A.A. Study of amber varieties on an FT-801 IR Fourier spectrometer using the ATR method. *Laboratory and Production*, 2019, no. 2 (6), pp. 105–109. (in Russian). doi: 10.32757/2619-0923.2019.2.6.104v.109
 10. Vorotnikov B.Yu., Bulychhev A.G., Markovtseva Yu.S., Syrkina A.A. Collection of spectra of fossil resins on the example of Baltic amber, practical application. *Proc. of the 12th International Baltic Maritime Forum*, 2024, pp. 270–278. (in Russian)
 11. Verkhovskaia I.A., Prokopenko V.T. Amber identification by Fourier Transform–Raman spectroscopy. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 193–199. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-2-193-199
 12. Lambert J.B., Santiago-Blay J.A., Wu Y., Levy A.J. Examination of amber and related materials by NMR spectroscopy. *Magnetic Resonance in Chemistry*, 2015, vol. 53, no. 1, pp. 2–8. doi: 10.1002/mrc.4121
 13. Lambert J.B., Poinar G.O. Amber: the Organic Gemstone. *Accounts of Chemical Research*, 2002, vol. 35, no. 8, pp. 628–636. doi: 10.1021/ar0001970
 14. Dal Corso J., Roghi G., Ragazzi E., Angelini I., Giaretta A., Soriano C., et al. Physico-chemical analysis of Albion (Lower Cretaceous) amber from San just (Spain): Implications for palaeoenvironmental and palaeoecological studies. *Geologica Acta*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 359–370. doi: 10.1344/105.000001871
 15. Sinyavsky N., Synashenko O., Kostrikova N. NMR Relaxometry study of demulsification of diesel fuel. *Applied Magnetic Resonance*, 2026, vol. 57, no. 1, pp. 2. doi: 10.1007/s00723-025-01820-w
 16. Slijkerman W.F., Hofman J.P. Determination of surface relaxivity from NMR diffusion measurements. *Magnetic Resonance Imaging*, 1998, vol. 16, no. 5-6, pp. 541–544. doi: 10.1016/s0730-725x(98)00058-7

Авторы

Корнева Ирина Павловна — кандидат технических наук, доцент, профессор, Калининградский государственный технический университет, Калининград, 236022, Российская Федерация, [sc 9274608000](https://orcid.org/0000-0002-6523-724X), <https://orcid.org/0000-0002-6523-724X>, ipk05@mail.ru

Синявский Николай Яковлевич — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Калининградский государственный технический университет, Калининград, 236022, Российская Федерация, [sc 6602423427](https://orcid.org/0000-0003-1285-206X), <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>, nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

Кострикова Наталья Анатольевна — кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе, Калининградский государственный технический университет, Калининград, 236022, Российская Федерация, [sc 56114883200](https://orcid.org/0000-0002-2969-0346), <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>, natalia.kostrikova@klgtu.ru

Authors

Irina P. Korneva — PhD, Associate Professor, Professor, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, [sc 9274608000](https://orcid.org/0000-0002-6523-724X), <https://orcid.org/0000-0002-6523-724X>, ipk05@mail.ru

Nikolaj Ya. Sinyavsky — D.Sc. (Physics & Mathematics), Professor, Head of Department, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, [sc 6602423427](https://orcid.org/0000-0003-1285-206X), <https://orcid.org/0000-0003-1285-206X>, nikolaj.sinyavskij@klgtu.ru

Nataliya A. Kostrikova — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Vice-Rector for Research, Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, 236022, Russian Federation, [sc 56114883200](https://orcid.org/0000-0002-2969-0346), <https://orcid.org/0000-0002-2969-0346>, natalia.kostrikova@klgtu.ru

Статья поступила в редакцию 03.02.2026
Одобрена после рецензирования 05.05.2026
Принята к печати 25.07.2026

Received 03.02.2026
Approved after reviewing 05.05.2026
Accepted 25.07.2026



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»