

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ ДЕГРАДАЦИИ ДОКУМЕНТОВ НА ПЕРГАМЕННОЙ ОСНОВЕ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

Лепехина Т. К.^{1,2}

Научный руководитель – доктор техн. наук, профессор Парфенов В. А.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский институт истории Российской академии наук

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
tanialep@mail.ru

Введение

Решение современных задач в области сохранения культурно-исторического наследия требует разработки и применения неинвазивных аналитических методов, обеспечивающих высокую информативность при минимальном воздействии на объекты исследования. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (ИК-Фурье спектроскопия) представляет собой один из наиболее эффективных инструментов, обеспечивающих молекулярную идентификацию широкого спектра материалов [1, 2]. Однако интерпретация сложных спектральных данных требует применения специализированных математических методов обработки экспериментальных данных [4]. В данной работе исследована возможность применения ИК-Фурье-спектрометра, работающего в режиме зеркального отражения, в сочетании с математическим анализом для диагностики состояния документов из пергамента.

Основная часть

Объектом исследования послужила пергаменная рукопись с темными пятнами неизвестной природы. Измерения выполнены при помощи спектрометра Alpha II (производитель Bruker Optik GmbH, Германия) в режиме зеркального отражения в спектральном диапазоне 4000–400 см⁻¹ с разрешением 4 см⁻¹. Для спектральных измерений были отобраны четыре зоны: пергамент без чернил и видимых загрязнений; участки с пятнами; участки с текстом, выполненным чернилами; контрольный пергамент другой рукописи той же коллекции. Для каждой группы зарегистрировано по пять спектров с накоплением 120 сканов. Предварительная обработка спектральных данных включала интерполяцию к единой сетке волновых чисел и стандартизацию интенсивностей. Для выделения спектральных признаков деградации применены метод главных компонент (МГК), а также дискриминантный анализ на основе частичных наименьших квадратов.

Предварительно для каждой группы образцов были рассчитаны усредненные спектры. Разностные спектры получены путем вычитания усредненного спектра пергамента из усредненных спектров участков с пятнами и чернилами. Такой подход позволил исключить вклад коллагеновой структуры основного материала и выделить спектральные сигналы, связанные с загрязнениями и продуктами деградации. В разностных спектрах выявлены специфические полосы поглощения в областях 3650–3400 см⁻¹ (валентные колебания связей О-Н и N-H), 1740 см⁻¹ (карбонильная группа сложных эфиров С=О) и 2900–2800 см⁻¹ (алифатические соединения С-Н), которые могут указывать на наличие органических соединений, в том числе потенциально связанных с продуктами биологической активности [4–6]. Анализ МГК показал, что первые две главные компоненты (ГК1 и ГК2) объясняют 84,4% общей дисперсии спектральных сигналов, при этом первая компонента демонстрирует наибольшие нагрузки в областях амидных полос (в диапазоне 1650–1550 см⁻¹), а также валентных колебаний О-Н и N-H, что свидетельствует о связи основных различий с изменениями белковой структуры и

степень гидратации. Пространство первой и второй компонент демонстрирует четкое разделение образцов: пятна формируют обособленный кластер, отличающийся как от чистого пергамента, так и от чернил. Точность классификации, определенная методом дискриминантного анализа, составила около 95%, что подтверждает надежность предлагаемого подхода для диагностики состояния пергамента.

Выводы

Предложенный подход на основе ИК-Фурье спектроскопии в режиме зеркального отражения и математического анализа позволяет выявлять спектральные признаки деградации пергамента, а также различать продукты загрязнения, естественного старения материала и следов чернил без повреждения объекта исследования. Высокая точность классификации (около 95%) подтверждает надежность методики диагностики. Получаемые с использованием такого подхода результаты могут быть использованы для мониторинга состояния книг и документов в фондах архивов и библиотек, а также для обоснования выбора методов реставрации и консервации рукописных памятников.

Литература

1. M.T.Doménech Carbó, F.Bosch Reig, J.V.Gimeno Adelantado, V.Periz Martínez. Fourier transform infrared spectroscopy and the analytical study of works of art for purpose of diagnosis and conservation // *Analytica Chimica Acta*. 1996. Vol. 330. P. 207–215. [https://doi.org/10.1016/0003-2670\(96\)00177-8](https://doi.org/10.1016/0003-2670(96)00177-8).
2. Elnaggar, A., Mahgoub H., Maestro-Guijarro L., Ibáñez A., Carmona-Quiroga P., Sanchez-Cortes S., Rehar Ž., Kos G., Ameen A., Frelih M., Strlič M., Oujja M., Castillejo M. Multianalytical Study of Amuletic and Talismanic Islamic-African Paper Manuscripts in the Slovene Ethnographic Museum // *ChemPlusChem*. 2025. Vol. 90. P. 18. <https://doi.org/10.1002/cplu.202500433>.
3. Koochakzaei A., Sabaghian M. Tannin characterization and sourcing in historical leathers through FTIR spectroscopy and PCA analysis // *Collagen and Leather*. 2023 Vol. 5. P. 9. <https://doi.org/10.1186/s42825-023-00128-4>.
4. Malea E., Boyatzis C. S., Karlis D., Palles D., Boghosian S., Zervos S. The Complementary Use of Raman, ATR-FTIR Spectroscopy, and Chemometrics for Investigating the Deterioration of Artificially Aged Parchment // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2024. Vol. 55. P. 1266–1290. <https://doi.org/10.1002/jrs.6755>.
5. Theodorakopoulos C., Odlyha M. Open-Access Infrared Spectra Depository for the Damage Assessment of Parchment // *Heritage*. 2025. Vol. 8, no. 3. 110. P. 16. <https://doi.org/10.3390/heritage8030110>.
6. Gonzalez L, Wess T. Use of attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy to measure collagen degradation in historical parchments // *Applied Spectroscopy*. 2008. Vol. 62, no. 10. P. 1108–1114. <https://doi.org/10.1366/000370208786049196>.