

ИСТОЧНИКОВЕДЕНИЕ, ИСТОРИОГРАФИЯ И МЕТОДЫ ИСТОРИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Проблемы и перспективы применения спектрозональной визуализации в исследованиях памятников письменности

А. П. Балаченкова, Е. А. Ляховицкий, Д. О. Цыпкин

Для цитирования: Балаченкова А. П., Ляховицкий Е. А., Цыпкин Д. О. Проблемы и перспективы применения спектрозональной визуализации в исследованиях памятников письменности // Вестник Санкт-Петербургского университета. История. 2021. Т. 66. Вып. 3. С. 950–970. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu02.2021.315>

К началу XXI в. цифровая спектрозональная (мульти- и гиперспектральная) визуализация стала одним из ключевых составляющих системного изучения памятников

Александра Петровна Балаченкова — ст. преп., Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологии и энергетики, Российская Федерация, 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4; abalachenkova@mail.ru

Aleksandra P. Balachenkova — Senior Lecturer, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, High School of Technology and Energy, 4, ul. Ivana Chernykh, St. Petersburg, 198095, Russian Federation; abalachenkova@mail.ru

Евгений Александрович Ляховицкий — канд. ист. наук, Российская национальная библиотека, Российская Федерация, 191069, Санкт-Петербург, пл. Островского, 1–3; stoglav@bk.ru

Evgenii A. Lyakhovitskii — PhD (History), National Library of Russia, 1–3, pl. Ostrovskogo, St. Petersburg, 191069, Russian Federation; stoglav@bk.ru

Денис Олегович Цыпкин — канд. ист. наук, доц., Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9; d.tsyppkin@spbu.ru

Denis O. Tsyppkin — PhD (History), Associate Professor, St. Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation; d.tsyppkin@spbu.ru

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта «Спектрозональная визуализация в изучении памятников письменности: проблемы и перспективы» № 19-111-50470.

The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project “Spectrosonal visualization in the study of written monuments: Problems and prospects” No. 19-111-50470.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2021

письменности. За последние двадцать лет с привлечением этого метода выполнено уже значительное количество исследований, поэтому авторы статьи сочли необходимым для отражения современной ситуации в области применения методов спектрально-зональной визуализации представить обзор наиболее репрезентативных проектов. Из постоянно действующих зарубежных научных институций, использующих методы спектрально-зональной визуализации, самыми результативными оказались Центр изучения рукописных культур Гамбургского университета, австрийский Центр визуального и материального анализа культурного наследия и Научно-исследовательский отдел Бодлианской библиотеки Оксфордского университета. Из числа временных проектов были выделены исследования, связанные с комплексным изучением палимпсестов, а также с оценкой состояния носителя текста, поскольку они оказали существенное влияние на развитие спектрально-зональной визуализации на методологическом и техническом уровнях. На основании анализа связи методов и конкретных исследовательских задач констатируется, что в XXI столетии в решении таких утилитарных задач, как визуализация нижних слоев палимпсестов, маркировочных знаков бумаги (с маскированием текста), прочтение закрашенных и выцветших записей, обнаружение подрисовок и изменений первоначального эскиза в миниатюрах и т. п., спектрально-зональная съемка стала рутинной технологией. В качестве наиболее перспективных для развития исследовательского потенциала этого метода выделяются следующие направления: 1) анализ спектрального поведения *вещества* при определении состава красителя; 2) анализ спектрального поведения *текста*, выполненного разными чернилами, в том числе в исследованиях, связанных с изучением *навыков письма*; 3) контроль состояния и динамики процессов *носителя* рукописных памятников (пергамена, бумаги и др.). Сравнение зарубежного опыта с отечественным, прежде всего с опытом Российской национальной библиотеки, показывает, что если в исследовании чернил российские специалисты находятся на хороших позициях, то направление, связанное с изучением носителя, требует дальнейшего освоения.

Ключевые слова: исследование памятников письменности, мультиспектральная визуализация, гиперспектральная визуализация, ИК-рефлектография.

Problems and Prospects of Application of Multispectral Imaging in the Manuscript Studies

A. P. Balachenkova, E. A. Lyakhovitskii, D. O. Tsyarkin

For citation: Balachenkova A. P., Lyakhovitskii E. A., Tsyarkin D. O. Problems and Prospects of Application of Multispectral Imaging in the Manuscript Studies. *Vestnik of Saint Petersburg University. History*, 2021, vol. 66, issue 3, pp. 950–970. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu02.2021.315> (In Russian)

By the beginning of the 21st century, digital multispectral and hyperspectral visualization has become one of the key components of the systematic study of historical manuscripts. Over the past twenty years, a significant amount of research with the application of this method has been carried out; therefore, the authors of this article have considered it necessary to reflect on the current situation in the field of application of multispectral visualization methods and to provide an overview of the most representative projects. It has been established that among the permanently operating foreign scientific institutions which use multispectral imaging methods, the most productive are the Center for the Study of Manuscript Cultures of the University of Hamburg, Centre of Image and Material Analysis in Cultural Heritage (Austria), and the Research Department of the Bodleian Library (Oxford). Among the temporary projects, studies related to the complex examination of palimpsests as well as to the evaluation of the state of the text carrier have been singled out since they had a significant impact on the devel-

opment of multispectral visualization at the methodological and technical levels. The review provides characteristics of the equipment used for multispectral imaging; discusses the relationship between methods and specific research tasks. It is stated that nowadays multispectral visualization has become a routine technique in solving utilitarian tasks. The following directions have been distinguished as the most promising for the development of the research potential of this method: 1) analysis of the spectral behavior of the substance in determining the composition of the dye; 2) analysis of the spectral behavior of the text made with different inks, including the research related to the study of writing skills; 3) control of the state and dynamics of processes of the carrier.

Keywords: manuscript studies, multispectral imaging, hyperspectral imaging, infrared reflectography.

Данная статья продолжает серию обзоров, посвященных использованию методов естественных наук в изучении рукописных книг и документов. В отличие от двух других наших работ, где рассматриваются актуальные исследования отдельных материалов, при помощи которых были выполнены рукописные памятники (бумага и чернила¹), данная публикация является попыткой описать и проанализировать современное состояние в области применения конкретного метода изучения письменных памятников — спектральной визуализации.

Сегодня спектральная визуализация весьма широко используется в естественно-научном исследовании рукописей. Это произошло вследствие активного развития фотографических (в России они получили наименование *фотоаналитических*) методов изучения документов, прежде всего в решении криминалистических задач. Как самостоятельное исследовательское направление спектральные методы анализа рукописей и документов оформились в начале XX в.² С 1990-х гг. начался новый этап их развития, связанный с бурным развитием цифровых регистраторов, вначале фотоэлектронных умножителей, видиконов, затем CCD- и CMOS-матриц. Возникшая в результате перехода на принципиально новую аппаратную базу цифровая спектральная визуализация имеет, как метод исследования памятников культуры, в том числе памятников письменности, ряд важных преимуществ.

Развитие производства цифровых регистраторов, совершенствование их характеристик, появление и развитие спектральных светодиодных осветителей привели к относительно невысокой стоимости комплекта оборудования начального уровня. Благодаря этому спектральная визуализация является сегодня едва ли не самым широко распространенным видом технико-технологического исследования памятников письменности, который практикуют как отдельные исследователи, так и специализированные научные подразделения. Такое положение

¹ Балаченкова А. П., Цыпкин Д. О. Возможности технологического анализа исторических бумаг в источниковедческом исследовании памятников // Вестник Санкт-Петербургского университета. История. 2017. Т. 62, вып. 2. С. 375–399; Цыпкин Д. О., Терещенко Е. Ю., Балаченкова А. П. и др. Комплексные исследования чернил древнерусских рукописей // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15, № 5. С. 579–587.

² Цыпкин Д. О. От «исследующей фотографии» к историко-документной экспертизе // Труды объединенного научного совета по гуманитарным проблемам и историко-культурному наследию 2010 г. СПб., 2011. С. 163–184; Easton R. L., Kelbe D. Statistical Processing of Spectral Imagery to Recover Writings from Erased or damaged Manuscripts // Manuscript Cultures. 2012. Vol. 7. P. 46.

дел обусловило большое разнообразие методик и применяемого оборудования: от простейших систем на базе любительских цифровых камер и светодиодных спектрональных осветителей до гиперспектральных камер. Относительная компактность и мобильность оборудования, высокая скорость обработки объекта делают возможной работу в читальных залах, непосредственно в хранилищах и, что наиболее важно, позволяют осуществлять обработку существенно больших массивов памятников, чем сложные лабораторные методы, такие как рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), рамановская спектроскопия и пр.

Еще одним важнейшим составляющим эвристического потенциала спектрональной визуализации является ее способность отражать пространственную структуру объекта, соотносимую с тем, как объект воспринимается простым наблюдением. Цифровая аппаратная основа позволяет многократно усилить этот потенциал благодаря программной обработке, в рамках которой возможно сравнение и сочетание снимков объекта в разных спектральных условиях. Эта особенность крайне важна тем, что способна дать целостное представление о технологическом процессе создания памятника, а значит, о навыках и представлениях его создателей. Подобные исследования весьма востребованы в таких дисциплинах, как искусствоведческое исследование живописи, археология, криминалистика. Если исходить из того, что памятники письменности, будучи вещественными продуктами определенных технологий, могут рассматриваться как памятники материальной культуры, то этот аспект возможностей спектрональной визуализации полностью применим и к ним. Все перечисленные преимущества привели к тому, что в начале XXI столетия цифровая спектрональная (мульти- и гиперспектральная) визуализация стала одной из ключевых составляющих системного изучения памятников письменности.

За последние двадцать лет (с 2000 г.) объем исследований с привлечением данного метода увеличился настолько, что для отражения актуальной ситуации в области применения методов спектрональной визуализации, то есть ситуации XXI в., обзор наиболее репрезентативных научных проектов представляется авторам насущной задачей.

Академические проекты в области комплексного анализа письменных памятников, включающие программу естественно-научных исследований, осуществляются в двух организационных формах — постоянно действующими коллективами с собственным приборно-аппаратным обеспечением и временными научными группами, собранными для осуществления конкретных исследований, в ходе которых используется аппаратная база, заимствуемая на стороне или предоставляемая одним из учреждений-участников проекта. Рассмотрим вначале постоянно действующие коллективы, применяющие методы мульти- и гиперспектральной съемки³.

³ Представленный обзор отражает только актуальные направления исследований и конфигурацию научных групп в данной области, поэтому некоторые коллективы, утратившие лидерство к настоящему времени, в нем не фигурируют. Например, здесь не упомянута находившаяся у истоков отечественной спектрональной съемки *Лаборатория консервации и реставрации документов СПбФ АРАН*. По этой же причине мы не упоминаем *Королевскую библиотеку Нидерландов (Koninklijke Bibliotheek)*, которая долгое время благодаря работам Г. ван Тиенена (G. van Thienen) была одним из ведущих центров в области спектрональной съемки маркировочных знаков бумаги.

Одной из наиболее активных научных институций, использующих спектрозональную визуализацию, является *Центр изучения рукописных культур Гамбургского университета* (*Center for the Study of Manuscript Cultures — CSMC*). В структуру Центра входит ряд академических подразделений (групп), специализирующихся на изучении локальных рукописных традиций Европы, Азии и Африки, а также естественно-научная лаборатория. CSMC был создан на базе коллектива, выполнявшего в 2008–2011 гг. долгосрочный исследовательский проект по программе SFB 950 «Manuskriptkulturen in Asien, Afrika und Europa». Естественно-научная лаборатория CSMC перманентно использует *инфракрасную рефлектографию* в качестве метода первичного скрининга рукописей для определения типа чернил, главным образом при изучении письменных памятников Востока⁴. Применение рефлектографии в инфракрасной области спектра обусловлено тем фактом, что оптические различия между *углеродосодержащими, растительными и железо-галловыми* чернилами лучше всего распознаются при сравнении их поведения в инфракрасной области спектра.

Приведем примеры исследований естественно-научной лаборатории CSMC, где применялась методика первичного скрининга в инфракрасной области спектра. Так, в 2013 г. сотрудники естественно-научной лаборатории совместно с членами тибетской и непальской групп Центра в ходе экспедиции в Непал по обследованию рукописей на тибетском и санскрите из собраний Национального архива и Библиотеки Кайзер в Катманду провели *in situ* методом инфракрасной рефлектографии скрининг чернил для их базовой дифференциации⁵.

Относительно недавно сотрудниками Центра (в составе большого авторского коллектива с участием представителей немецких, итальянских и французских научно-исследовательских учреждений, специализирующихся на проблемах сохранения письменных памятников, и соответствующих музейных подразделений) была опубликована проблемная работа, посвященная так называемым *смешанным чернилам*, то есть чернилам, полученным путем смешивания углеродосодержащих чернил (*сажевых или угольных*) с *растительными* (приготовленными из экстрактов танина) или *железо-галловыми*, и методам их выявления, включая ИК-скрининг⁶.

В сотрудничестве с участниками проекта «Отслеживая пути папируса и пергамена. Археологический атлас коптской литературы. Литературные тексты в их первоначальном контексте. Создание, копирование, бытование, распространение и хранение» (*Tracking Papyrus and Parchment Paths. An Archaeological Atlas of Coptic Literature. Literary Texts in Their Original Context. Production, Copying, Usage, Dissemination and Storage — PAThs*), реализуемого с 2015 г. на базе Римского университета Sapienza (Sapienza — Università di Roma), специалисты CSMC начали масштабное

⁴ См.: Centre for the Study of Manuscript Cultures. URL: www.manuscript-cultures.uni-hamburg.de (дата обращения: 10.07.2020); Manuscript Lab. URL: https://www.manuscript-cultures.uni-hamburg.de/lab_methoden_e.htmlmethode5 (дата обращения: 10.07.2020).

⁵ Almogi O., Kindzorra E., Hahn O., Rabin I. Inks, Pigments, Paper in Quest of Unveiling the History of the Production of a Tibetan Buddhist Manuscript Collection from the Tibetan-Nepalese Borderlands // Journal of the International Association of Buddhist Studies. 2015. Vol. 36-37. P. 93–117.

⁶ Colini C., Hahn O., Bonnerot O. et al. The quest for the mixed inks // Manuscript Cultures. 2018. Vol. 11. P. 41–48.

исследование технологической истории чернил коптских рукописей⁷. Первоочередным материалом для анализа стали рукописи, выявленные в рамках проекта RATHs, — позднеантичные и раннесредневековые рукописи из собраний коптских рукописей Государственной библиотеки в Берлине, Национальной библиотеки Франции, библиотеки Кембриджского университета. В ходе данного проекта была установлена наиболее ранняя на настоящий момент рукопись, выполненная железно-галловыми чернилами, — Книга Притчей Соломоновых IV–V вв. из библиотеки Белого монастыря (собрание Государственной библиотеки в Берлине). Кроме того, исследователи обнаружили, что чернила глубокого черного цвета в рукописных фрагментах из библиотеки собора в Тинисе оказались железно-галловыми, а не угольными, как первоначально предполагалось. Их проникаемость в инфракрасном диапазоне указала на железистую природу чернил, а последующая спектроскопия с помощью РФА дала значительный пик железа.

Идея применения ИК-рефлектографии для первичного мониторинга чернил, по всей вероятности, была привнесена в CSMC из практики более ранних исследований Федерального института материаловедения и испытания материалов в Берлине (*Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM*), сотрудники которого О. Хан и И. Рабин в настоящее время возглавляют основные направления работы естественно-научной лаборатории Центра. Так, ими выполнялись исследования по определению типа чернил в эфиопских и коптских рукописях⁸.

Хотя сейчас в анализе чернил, проводимом CSMC, преобладает «ближневосточное» направление, продолжают реализовываться отдельные проекты по изучению чернил западноевропейских рукописей, например листового фрагмента пергаментной нотированной рукописи начала XV в. из г. Атри (Италия)⁹. При исследовании с помощью ИК-рефлектографии помимо решения основной задачи — визуализации частично утраченного текста — были выявлены две разновидности железно-галловых чернил, а также установлена последовательность выполнения нотной записи и текста литургического песнопения. Еще одна нотированная рукопись, исследование которой методом мультиспектральной визуализации проводил CSMC, — это так называемый палимпсест Сан-Лоренцо. Под верхним слоем, представляющим собой опись церковного имущества XVII в., было скрыто около 200 записей музыкальных произведений светского характера, относящихся к XIV в. и поэтому имеющих исключительную ценность для истории музыки¹⁰. Для сбора и последующей математической обработки информации мультиспектральных изо-

⁷ Ghigo T., Bonmerot O., Buzi P. et al. An attempt at a systematic study of inks from Coptic manuscripts // *Manuscript Cultures*. 2018. Vol. 11. P. 157–164; Ghigo T., Rabin I. Gaining Perspective into the Materiality of Manuscripts: The Contribution of Archaeometry to the Study of the Inks of the White Monastery Codices // *Coptic Literature in Context (4th — 13th cent.): Cultural Landscape, Literary Production, and Manuscript Archaeology*. Roma, 2020. P. 273–282.

⁸ См., например: Rabin I., Schütz R., Kohl A. et al. Identification and classification of historical writing inks in spectroscopy // *Comparative Oriental Manuscript Studies Newsletter*. 2012. No. 3. P. 26–30; Nosnitsin D., Kindzorra E., Hahn O., Rabin I. A “Study Manuscript” from Qäqäma (Təgray, Ethiopia): Attempts at Ink and Parchment Analysis // *Comparative Oriental Manuscript Studies Newsletter*. 2014. No. 7. P. 28–31.

⁹ Bosch S., Colini C., Hahn O. et al. The Atri fragment revisited. I: Multispectral imaging and ink identification // *Manuscript Cultures*. 2018. Vol. 11. P. 141–156.

¹⁰ Janke A., McDonald C. Multispectral imaging of the San Lorenzo Palimpsest (Florence, Archivio del Capitolo di San Lorenzo, Ms. 2111) // *Manuscript Cultures*. 2012. Vol. 7. P. 113–125.

бражений использовались методы главных (principal component analysis — PCA) и независимых компонент (independent component analysis — ICA), впервые примененные для аналогичной задачи в ходе международного проекта по визуализации палимпсеста Архимеда (о чем будет сказано далее).

В 2014 г. был создан австрийский *Центр визуального и материального анализа культурного наследия (Centre for Image and Material Analysis — CIMA)*, представляющий собой межучрежденческую сеть естественно-научных и IT-лабораторий. В настоящий момент основной задачей центра является оцифровка наиболее редких и ценных пергаменных кодексов (относящихся к латинской, греческой и славянской рукописным традициям) из разных собраний Австрии. При реализации специализированной национальной программы, а также проектов, посвященных изучению синаяских глаголических рукописей («Синайские фрагменты глаголических Сакраментариев (Евхологиев)», «Загадка Синайской глаголической традиции», «Происхождение старославянских глаголических рукописей»)¹¹, специалисты центра разработали собственный аппаратный комплекс, а также сформировали набор методов для сбора, обработки и улучшения *мультиспектральных изображений* пергаменных рукописей¹².

К научным подразделениям, активно применяющим *мульти- и гиперспектральную визуализацию*, несомненно, относится и *Научно-исследовательский отдел Национальной художественной галереи в Вашингтоне (Scientific Research Department, National Gallery of Art)*. Здесь был сконструирован аппаратно-программный комплекс для гиперспектральной визуализации, позволяющий как проводить оцифровку произведений искусства в разных спектральных режимах, так и осуществлять спектроскопический анализ полученных изображений¹³. Некоторые из исследований, выполненных сотрудниками Научно-исследовательского отдела, были связаны с изучением миниатюр лицевых рукописей¹⁴.

В качестве научного центра, где широко используется гиперспектральная визуализация, необходимо упомянуть *Научно-исследовательский отдел Бодлианской библиотеки Оксфордского университета (Heritage Science, Bodleian Library, University of Oxford)*. Более того, научно-исследовательский отдел Бодлианской библиотеки, в лице его главного специалиста Дэвида Хоувелла, зарекомендовал себя как методический центр в области гиперспектральной визуализации иллюминированных

¹¹ См.: CIMA. URL: <https://cima.or.at> (дата обращения: 10.07.2020).

¹² Lettner M., Diem M., Sablatnig R., Miklas H. Registration and enhancing of multispectral manuscript images // 16th European Signal Processing Conference (Lausanne, Switzerland, August 25–29, 2008). URL: <https://www.eurasip.org/Proceedings/Eusipco/Eusipco2008/titles.html> (дата обращения: 10.07.2020); Gau M., Miklas H., Lettner M., Sablatnig R. Image acquisition & processing routines for damaged manuscripts. Digital Medievalist. 2011. No. 6. DOI: <http://doi.org/10.16995/dm.25>; Миклас Х., Бреннер С., Саблатниг Р. Мультиспектральная съемка для цифровой реставрации древних рукописей: устройства, методы и практические аспекты // Историческая информатика. 2017. № 3. С. 116–134. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=23697 (дата обращения: 10.07.2020); Brenner S., Sablatnig R., Cappa F. et al. Virtual conservation and restoration via multispectral imaging and spectroscopy // Исследование и реставрация рукописей: материалы конференции — 2019. СПб., 2020. С. 15–27.

¹³ Delaney J. K., Zeibel J. G., Thoury M. et al. Visible and infrared imaging spectroscopy of Picasso's Harlequin Musician: mapping and identification of artist materials in situ // Applied Spectroscopy. 2010. Vol. 64, no. 6. P. 584–594.

¹⁴ Ricciardi P., Delaney J. K., Glinsman L. et al. Use of visible and infrared reflectance and luminescence imaging spectroscopy to study illuminated manuscripts: pigment identification and visualization of underdrawings // Proceedings of SPIE. 2009. Vol. 7391. <https://doi.org/10.1117/12.827415>.

рукописей¹⁵. Задачи, которые здесь решают с помощью данного метода, — чтение угасших, стертых и сильно загрязненных текстов, а также картирование и идентификация пигментов. Назовем некоторые из недавно завершившихся и текущих проектов отдела, в реализации которых была задействована спектрально-аналитическая визуализация.

Прежде всего, это работы по визуализации закрашенного текста отдельных листов пергаменных рукописей, использованных затем в качестве обложек для инкунабул из собрания Бодлианской библиотеки¹⁶; а также прочтение фрагмента рукописи на бересте, содержащей индийский математический трактат на санскрите, в котором впервые фигурирует символ ноля (так называемая рукопись Бахшали)¹⁷.

Еще один крупный проект этого подразделения Бодлианской библиотеки — исследование путем гиперспектральной съемки мезоамериканского палимпсеста, созданного до испанского завоевания, — одной из пяти сохранившихся рукописей на языке миштеков¹⁸. Для повторного использования поверхность пергамента была покрыта гипсом и мелом, полностью скрывшими миштековские идеограммы.

Совместно со специалистами Института технологии в Рочестере (США) в 2015 г. методом гиперспектральной визуализации исследовалась карта Гофа (Gough Map) из собрания Бодлианской библиотеки¹⁹. Это одна из самых ранних карт Британских островов, которая была создана в XV в. и впоследствии неоднократно редактировалась. Сбор гиперспектрального изображения карты Гофа должен был решить такие задачи, как усиление угасшего текста и анализ пигментов и красителей, использованных при ее создании и редактировании. Как считают участники проекта, анализ красителей позволил не только идентифицировать красящие вещества, но и обнаружить исправления и дополнения, сделанные в ходе редактирования карты, что, вероятно, даст возможность определить основные этапы ее создания.

Упомянем в связи с этим проект по изучению десяти миниатюр шести армянских рукописей XI–XVIII вв. из фондов Бодлианской библиотеки, на материале которых специалисты Научно-исследовательского отдела пытались дать сравнительную оценку эффективности двух неразрушающих методов анализа пигментов — рамановской спектроскопии и гиперспектральной визуализации²⁰. Рамановская спектроскопия и гиперспектральная визуализация в диапазоне 380–1000 нм были применены для анализа одних и тех же фрагментов миниатюр, после чего точность и эффективность гиперспектрального исследования сравнивались с результатами рамановской спектроскопии с использованием эталонных баз данных спектров отражения, специально составленных для этого исследования. Участники проекта

¹⁵ Howell D. The potential of hyperspectral imaging for researching colour on artefacts // *Digital Imaging of Artefacts: Developments in Methods and Aims*. Oxford, 2018. P. 37–48.

¹⁶ Ibid. P. 40.

¹⁷ Ibid. P. 42.

¹⁸ Snijders L., Zaman T., Howell D. Using hyperspectral imaging to reveal a hidden precolonial Mesoamerican codex // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2016. Iss. 9. P. 143–149.

¹⁹ Bai D., Messinger D. W., Howell D.: 1) Hyperspectral analysis of cultural heritage artifacts: pigment material diversity in the Gough Map of Britain // *Optical Engineering*. 2017. Vol. 56, no. 8. Art. 081805; 2) A pigment analysis tool for hyperspectral images of cultural heritage artifacts // *Proceedings of SPIE*. 2017. Vol. 10198. <https://doi.org/10.1117/12.2261852>.

²⁰ Maybury I. J., Howell D., Terras M., Viles H. Comparing the effectiveness of hyperspectral imaging and Raman spectroscopy: a case study on Armenian manuscripts // *Heritage Science*. 2018. Vol. 6. Art. 42.1.

делают вывод, что результаты гиперспектрального исследования в диапазоне 380–1000 нм согласуются с результатами рамановской спектроскопии в 93 % случаев, но методом гиперспектрального исследования значительно быстрее сканируются большие области изображений. Гиперспектральная визуализация может использоваться вместе с рамановской спектроскопией для более эффективного выявления и картирования больших областей пигмента, чем при одной рамановской спектроскопии.

Если среди британских научных групп современным лидером в области гиперспектрального исследования рукописных памятников является отдел консервации Бодлианской библиотеки, то ведущим учреждением в области мультиспектральной визуализации памятников искусства и книжности с 2007 г. можно считать *Школу науки и технологии Университета Ноттингем Трент (School of Science & Technology, Nottingham Trent University)*. Ее сотрудниками был разработан переносной программно-аппаратный комплекс PRISMS — система для мульти- и гиперспектральной визуализации, специально разработанная для съемки изображений настенных росписей *in situ*. Первоначально этот приборный комплекс предназначался для измерения спектральной отражательной способности материалов. Другая его задача состояла в получении качественных изображений в различных спектральных инфракрасных диапазонах: в видимом/ближнем (400–900 нм) и коротковолновом (900–1700 нм). В конфигурации, адаптированной для применения на близком расстоянии (без телескопа), данный комплекс в последнее время использовался для изучения рукописных памятников в ходе совместных проектов Бодлианской библиотеки и Школы науки и технологий Университета Ноттингем Трент.

Среди этих исследований в первую очередь упомянем проект по оцифровке и материаловедческому анализу так называемой карты Селдена (*Selden Map*)²¹. Карта Селдена — это хранящаяся с середины XVII столетия в собрании библиотеки Оксфордского университета карта Китая, названная по имени последнего владельца — известного лондонского адвоката Джона Селдена. На ней отмечены морские торговые пути в Азии, а также города и порты, существовавшие в эпоху династии Мин. Во время консервации карты в 2009 г. Бодлианская библиотека пригласила группу специалистов из Школы науки и технологии Университета Ноттингем Трент провести мультиспектральную визуализацию отдельных участков карты с помощью системы PRISMS, а впоследствии, с усовершенствованием системы, и гиперспектральную съемку. Детальный анализ различных полос гиперспектрального куба наряду с визуальным осмотром крупномасштабного цветного изображения показал, что полного эскизного плана карты не было. Она, очевидно, выполнялась поэтапно и не была завершена. Кроме того, на основе полученных данных о составе красителей исследователи выдвинули гипотезу о создании карты Селдена на о. Суматра (на территории современной провинции Ачех).

На приборной базе Школы науки и технологии Университета Ноттингем Трент специалисты из отдела консервации Бодлианской библиотеки и исследовательской лаборатории археологии и истории искусства Оксфордского университета, а также Консерватории Университета Западной Австралии провели анализ чернил и красителей иллюминированного еврейского молитвенника XV в. из коллекции

²¹ Kogou S., Neate S., Coveney C. et al. The origins of the Selden map of China: scientific analysis of the painting materials and techniques using a holistic approach // *Heritage Science*. 2016. Vol. 4. Art. 28.

Д. Оппенгеймера (собрание Бодлианской библиотеки)²². Авторы сделали попытку через установление близости пигментов, использовавшихся при переписке текста и создании красочных заставок, определить, как был организован процесс переписки и иллюминирования рукописи (были ли эти этапы последовательными или параллельными) и является ли переписчик молитвенника Ашер бен Ицхак еще и художником, выполнившим заставки. Мультиспектральная визуализация выполнялась в Университете Ноттингем Трент также с помощью системы PRISMS.

В ряду научных коллективов, применяющих спектрозональную съемку, назовем *Университетский колледж Лондона (University College of London — UCL)*, который в последнее время заметно активизировал применение гиперспектральной визуализации в изучении письменных памятников, в частности исторической бумаги. В 2017 г. специалистами из Великобритании и Китая на базе *Института устойчивого наследия Университетского колледжа Лондона (UCL Institute for Sustainable Heritage)* было проведено исследование, демонстрирующее, по мнению авторов, возможности гиперспектральной визуализации в ближней ИК-области для получения технологической информации об исторической бумаге *восточного типа*²³. Цель калибровки была разработана с использованием 105 эталонных образцов исторической ближневосточной («исламской») бумаги из собрания Института устойчивого наследия. Образцы предварительно исследовались на наличие крахмала (с помощью йодного теста) и степень полимеризации целлюлозы. Гиперспектральная визуализация осуществлялась с помощью сканера, работающего в режиме линейного сканирования («push broom») в диапазоне волн 1000–2500 нм. В результате обработки гиперкуба данных в программе SpectraSENS была разработана количественная химическая карта степени полимеризации целлюлозы для одного из образцов.

Следует отдельно отметить, что применение спектрозональной съемки к изучению бумаги *европейского типа* как носителя рукописных памятников по традиции ограничивается визуализацией ее маркировочных знаков. Значительное количество учреждений хранения имеет на вооружении соответствующие аппаратно-программные комплексы и активно использует их для ИК-съемки филиграней бумаги²⁴.

Перечислим теперь некоторые важные академические проекты, выполняющиеся *временными* коллективами. В первую очередь следует назвать исследования, связанные с комплексным изучением и публикацией значимых памятников рукописного наследия, где спектрозональная съемка использовалась по традиции, сформированной еще в эпоху фотоаналитических методов, то есть для улучшения читаемости или визуализации угасшего, скрытого либо стерттого текста.

²² *Wijsman S., Neate S., Kogou S., Liang H.* Uncovering the Oppenheimer Siddur: using scientific analysis to reveal the production process of a medieval illuminated Hebrew manuscript // *Heritage Science*. 2018. Vol. 6. Art. 15.

²³ *Mahgoub H., Chen H., Gilchrist J.R. et al.* Quantitative chemical near-infrared hyperspectral imaging of Islamic paper // *ICOM-CC 18th Triennial Conference Preprints*, Copenhagen, 4–8 September 2017. Paris, 2017.

²⁴ См., например: *Brown N.* Collection Care welcomes a new multispectral imaging system // *National Archives, Kew*. URL: <https://blog.nationalarchives.gov.uk/collection-care-welcomes-a-new-multispectral-imaging-system> (дата обращения: 10.07.2020); *Калашиникова А. А.* Техника съемки русских актов XV–XVII вв. в ближнем инфракрасном диапазоне // *Фотография. Изображение. Документ*. Вып. 9. СПб., 2020. С. 42–46.

В 2003–2009 гг. осуществлялся крупный международный проект по изучению и публикации «Синайского кодекса» (“Codex Sinaiticus”)²⁵ — греческой рукописи середины IV в., содержащей наиболее раннюю версию полного текста Нового Завета. Главными учреждениями — участниками проекта были библиотеки, владеющие частями «Синайского кодекса»: *Британская библиотека (The British Library)*, *библиотека Лейпцигского университета (Universitätsbibliothek Leipzig)*, *Российская национальная библиотека, библиотека монастыря Св. Екатерины на Синае*; кроме того, в нем принимали участие и другие академические учреждения. В ходе проекта для «усиления» многочисленных фрагментов текста с выраженным выцветанием чернил применялась мультиспектральная визуализация, осуществленная с помощью системы MUSIS-2007, разработанной фирмой Forth Photonics²⁶. Технология визуализации, предусмотренная в этом комплексе, позволяет интегрировать в одной камере несколько режимов визуализации (отражение, флуоресценция) и спектральных диапазонов от УФ до ближнего ИК-диапазона. Основной объем работ по мультиспектральной съемке был проведен специалистами Британской библиотеки, где в настоящее время хранится самый крупный фрагмент этого памятника (347 листов).

В 1998–2008 гг. проводилось масштабное исследование так называемого палимпсеста Архимеда — пергаменного кодекса, исходно содержавшего записанные в X столетии в Византии тексты Архимеда (часть из которых не встречается в других списках) и повторно использованного в XIII в. для переписки богослужебных текстов²⁷. В проекте, который реализовывался на базе *Художественного музея Уолтерс в Балтиморе (Walters Art Museum)*, принимали участие представители нескольких научных институций из США (*Стэнфордского университета (Stanford University)*, *Института технологии в Рочестере (Rochester Institute of Technology)*, компаний *R. V. Toth Associates* и *Equipoise Imaging LLC*) и из Великобритании (*Оксфордского и Кембриджского университетов*). Цифровая мультиспектральная съемка палимпсеста для раскрытия нижнего слоя пергамента осуществлялась американскими специалистами из корпорации «Боинг» (Boeing LTC), компании *Equipoise Imaging LLC* и Института технологии в Рочестере. Сбор спектральной информации проходил в несколько этапов и на разном оборудовании. Он проводился в 11 различных диапазонах освещения с использованием светодиодов на длинах волн от ближнего ультрафиолетового (365 нм) через видимые длины волн до ближнего инфракрасного диапазона (870 нм)²⁸.

Протокол сбора и обработки мультиспектральных данных, разработанный участниками проекта, послужил образцом для ряда аналогичных проектов²⁹, пре-

²⁵ См.: Codex Sinaiticus. URL: <https://codexsinaiticus.org/ru> (дата обращения: 10.07.2020).

²⁶ Knight B. Multi-spectral imaging for the Codex Sinaiticus // Codex Sinaiticus. URL: https://codexsinaiticus.org/en/project/conservation_msi.aspx (дата обращения: 10.07.2020).

²⁷ См.: The Archimedes Palimpsest: <http://www.archimedespalimpsest.org> (дата обращения: 10.07.2020).

²⁸ Easton R. L., Knox K. T., Christens-Barry W. A., Boydston K. Spectral Imaging Methods Applied to the Syriac Galen Palimpsest // Manuscript Studies: A Journal of the Schoenberg Institute for Manuscript Studies. 2018. Vol. 3, no. 1. P. 69–82.

²⁹ Например, при визуализации палимпсеста Сан-Лоренцо гамбургским Центром изучения рукописных культур (см. выше), а также Хлудовского глаголического палимпсеста XI в. независимым коллективом исследователей из Государственного исторического музея (г. Москва) и Института космических исследований Российской Академии наук (см.: Уханова Е. В., Жижин М. Н.,

жде всего для визуализации так называемого сирийского палимпсеста Галена, первоначально сирийской рукописи VI в., которую в XI в. использовали для записи греческих псалмов. Состав учреждений — участников этого проекта был близок к составу участников предыдущего проекта³⁰. Проводилось две сессии визуализации палимпсеста: предварительная в марте 2009 г. и полная в марте 2010 г. Изображения собирались в 13 полосах отражения в диапазоне от ультрафиолетовой области до видимого и инфракрасного (365–940 нм). В этом проекте нашел широкое применение методический опыт, полученный при визуализации палимпсеста Архимеда, а именно: применение ложноцветной инфракрасной (False-color infrared — FCIR) визуализации для улучшения читаемости стертых текстов, а также обработка изображений на основе многополосной статистики методом главных компонент³¹. В ходе изучения мультиспектральных изображений было высказано предположение, что текст палимпсеста является сирийским переводом VI в. трактата Галена «О микстурах и действенности простых лекарств»³².

Из продолжающихся исследований подобного рода необходимо упомянуть проект «Палимпсесты Синае», нацеленный на воссоздание первоначальных текстов 74 палимпсестов из собрания монастыря св. Екатерины на Синае. Исследование рукописей осуществляется на базе монастырской библиотеки группой специалистов из библиотеки *Калифорнийского университета (University of California, Los Angeles — UCLA)* и *Электронной библиотеки ранних рукописей (Early Manuscripts Electronic Library — EMEL)*, специально разработавшей методическую и приборную базу для спектрозональной визуализации синайских рукописей (*съемка в ближнем, ИК-, УФ-диапазонах, в проходящем и отраженном свете*) с целью восстановления стертых текстов³³.

Близким по задачам к исследованиям, перечисленным выше, является недавно завершённый проект, выполнявшийся большим коллективом ученых, которые представляли музеи, университетские и коммерческие лаборатории Великобритании, США и Австралии³⁴. Цель проекта заключалась в поиске методов прочтения древнеегипетских текстов, оказавшихся внутри так называемого «картонажа» мумий, состоящего из многослойных фрагментов бывших в употреблении *папирус-*

Андреев А. В., Пойда А. А. Естественные-научные и традиционные методы в исследовании Хлудовского глаголического палимпсеста XI в. (ГИМ, Хлуд. 117). Предварительные результаты // *Studi Slavistici*. 2018. Vol. 15, iss. 2. P. 5–38). В настоящем обзоре этот проект специально не рассматривался, поскольку исследования данной научной группы не имеют признаков новизны.

³⁰ Toth M. B. Pulling it all together. Managing the Syriac Galen Palimpsest Project // *Manuscript Studies: A Journal of the Schoenberg Institute for Manuscript Studies*. 2018. Vol. 3, no. 1. P. 9–32.

³¹ Easton R. L., Knox K. T., Christens-Barry W. A., Boydston K. Spectral Imaging Methods Applied to the Syriac Galen Palimpsest // *Ibid*. P. 69–82.

³² Afif N., Bhayro S., Pormann P. E. et al. Analyzing Images, Editing Texts. The Manchester Project // *Ibid*. 155–184.

³³ См.: Sinai Palimpsests Project. URL: <https://sinai.library.ucla.edu> (дата обращения: 10.07.2020).

³⁴ В Великобритании это несколько кафедр и Музей античной археологии Питри Университетского колледжа Лондона (UCL); Институт стоматологии Лондонского университета королевы Марии; Школа наук о Земле, атмосфере и окружающей среде; кафедра классической филологии и древней истории Университета Манчестера; Колледж искусств, гуманитарных и социальных наук Университета Эдинбурга. В США — Национальная ускорительная лаборатория Стэнфордского университета (SLAC), кафедра геологии и геоэкологии Колледжа Чарльстона; кафедра офтальмологии Университета Дьюка и компании Equipoise Imaging и R. B. Toth Associates. В Австралии — Школа физики Университета Западной Австралии.

ных свитков³⁵. Исследователи сопоставили возможности восьми различных методов, проанализировав результаты визуализации четырех модельных объектов, специально изготовленных для этой цели по древнеегипетской технологии из современного папируса и реплицированных чернил. Рассмотренные методы включали оптические (**мультиспектральную визуализацию в отраженном и проходящем свете** и оптическую когерентную томографию), рентгеновские (РФА, рентгеновскую флуоресцентную томографию, рентгеновскую микрофотографию и фазово-контрастную рентгенографию) и терагерцовые. Мультиспектральная съемка осуществлялась в Университетском колледже Лондона с помощью комплекса, разработанного фирмой R. V. Toth Associates. Последующая обработка изображений проводилась с использованием метода главных компонент. По мнению ученых, спектрозональная визуализация обеспечивает хорошее пространственное разрешение, но дает достаточную спектральную информацию о чернилах, находящихся только на поверхности или под одним слоем папируса.

Из других проектов, посвященных оценке потенциала различных методов визуализации скрытого или поврежденного текста, следует упомянуть исследование, которое проводилось немецкими специалистами, представляющими *Кафедру пищевых технологий и товароведения (экотрофологии) Высшей школы Фульды (Oecotrophologie Hochschule Fulda)*, Главную библиотеку Факультета теологии Фульды (*Theologische Fakultät — Bibliothek des bischöflichen priesterseminars Fulda*) и *Группу средневекового латинского словаря Баварской академии наук (Mittellateinisches Wörterbuch Bayerische Akademie der Wissenschaften)*. Объектом изучения был листовой фрагмент из пергаменной рукописи IX в. с отрывком известного трактата Боэция «Утешение философией» (*“De consolatione philosophiae”*), послуживший обложкой для книги более позднего времени (собрание Главной библиотеки Теологического факультета Фульды)³⁶. Его подвергли **лазерному сканированию в ближнем ИК-диапазоне (NILS), ИК-рефлектографии и съемке при УФ-освещении**, сравнив полученные результаты по степени возможности дифференциации чернил. По мнению ученых, лазерное сканирование в ближней ИК-области имеет преимущества перед двумя другими техниками визуализации угасших или плохо различимых текстов.

К исследованиям, связанным с проблемами визуализации текстов, методологически примыкают научные проекты, посвященные идентификации чернил и мониторингу состояния чернил и носителя текста. В 2003 г. группа нидерландских специалистов из компаний *TNO Buildings & Constructions* и *Art Innovation* выполняла проект, направленный на изучение возможностей ложноцветной инфракрасной съемки (FCIR) в идентификации металло-таниновых чернил³⁷. Реплицированные чернила на основе железа и меди были нанесены на образцы бумаги: 1) из белой целлюлозы мягких пород древесины; 2) целлюлозы, полученной из хлопкового

³⁵ Gibson A., Piquette K. E., Bergmann U. et al. An assessment of multimodal imaging of subsurface text in mummy cartonnage using surrogate papyrus phantoms // *Heritage Science*. 2018. Vol. 6. Art. 7.

³⁶ Sorbello Staub A., Staub J., Richter I., Birringer M. Near-Infrared Laser Scanning (NILS) to Differentiate Historical Inks, Deployed on a Stained and Faded Ninth-Century Fragment of Boethius Reused as Binding Material: Proving a Concept // *Restaurator*. 2016. Vol. 37, iss. 1. P. 1–13.

³⁷ Havermans J., Abdul Aziz H., Scholten H. Non Destructive Detection of Iron Gall Inks by Means of Multispectral Imaging. Part 1: Development of the Detection System // *Restaurator*. 2003. Vol. 24, iss. 1. P. 55–60; Part 2: Application on original objects affected with iron-gall-ink corrosion // *Ibid*. Vol. 24, iss. 2. P. 88–94.

линта. Затем образцы были подвергнуты ускоренному старению при температуре 90 °С и относительной влажности 50 % в течение 8 и 16 дней. В качестве тест-объекта использовалась строка текста, выполненная углеродистыми чернилами лазерного принтера. При съемке системой для мультиспектральной визуализации MUSIS-2007, работающей в диапазоне 320–1550 нм с инфракрасным, красным и зеленым фильтрами, металло-таниновые чернила приобрели красный цвет, тогда как углеродсодержащие остались черными. Ученые пришли к выводу, что с помощью FCIR возможна неразрушающая идентификация металлических таниновых чернил (как на основе железа, так и на основе меди). Была отмечена корреляция между плотностью цвета, получаемого в процессе обработки изображений, и возрастом чернил. Это означает, по мнению исследователей, что ложноцветная ИК-визуализация может предоставить информацию о возрасте чернил и бумаги, а дальнейшие исследования позволят установить более четкую связь между возрастом изучаемого объекта и плотностью цвета на его изображениях, полученных с помощью FCIR.

В продолжение исследования метод ложноцветной инфракрасной съемки был применен участниками проекта для идентификации железо-галловых чернил в нескольких рукописях и рисунках из собрания Национального архива Нидерландов (Nationaal Archief). В качестве контрольных образцов использовались реплицированные и коммерческие чернила (сепия, красные меловые чернила, железо-галловые, угольные), нанесенные на целлюлозный субстрат. Результаты, полученные на подлинных объектах, совпали с данными первоначального эксперимента³⁸.

Отметим, что *Национальный архив Нидерландов (Nationaal Archief)* стал одним из пионеров в применении гиперспектральной визуализации для *мониторинга состояния архивных материалов*. С 2004 г. методом гиперспектральной визуализации в архиве проводятся исследования, включающие идентификацию, количественную оценку и мониторинг повреждений архивных материалов: биологических повреждений, коррозии железо-галловых чернил, повышения кислотности бумаги-носителя и выцветания красителей. По запросу архива компанией Art Innovation была специально разработана модульная система для количественной гиперспектральной съемки SEPIA. Этот приборный комплекс способен предоставлять полностью откалиброванные данные спектров отражения на 70 длинах волн в диапазоне от ближнего ультрафиолетового диапазона (365 нм) до видимого и ближнего инфракрасного (1100 нм)³⁹.

В ряду исследований, посвященных оценке состояния рукописных памятников с помощью гиперспектральной визуализации, упомянем проекты канадских

³⁸ Тот же метод (FCIR) идентификации железо-галловых чернил был в 2007 г. предложен финскими специалистами в области промышленного испытания бумаги. См.: *Kecskeméti I., Seppälä M.* False-colour infrared (FCIR) imaging: An inexpensive method for identifying iron-gall ink by standard digital camera // *Papierrestaurierung*. 2007. Т. 7, nr. 1. S. 18–21. — Метод ложноцветной ИК-визуализации для определения типа чернил активно использует и независимый исследователь из Малайзии *Sadro Zekrgoo*. См.: *Zekrgoo S.* Methods of Creating, Testing and Identifying Traditional Black Persian Inks // *Restaurator*. 2014. Vol. 35, iss. 2. P. 133–158.

³⁹ *Padoan R., Steemers Th. A. G., Klein M. E. et al.* Quantitative hyperspectral imaging of historical documents: technique and applications // 9th International Conference on NDT of Art, Jerusalem, 25–30 May 2008: Conference Papers. URL: www.ndt.net/search/docs.php3?MainSource=65 (дата обращения: 10.07.2020).

специалистов. В 2009 г. ученые из Центра научного и кураторского анализа произведений живописи при кафедре химии Университета Виннипега, лабораторий Уайтшелл компании *Atomic Energy of Canada Limited (AECL)*, Отдела сохранения культурного наследия и исследования материалов Канадского института охраны наследия изучали два актовых документа начала XX в. большой исторической значимости (на пергамене и на бумаге) из собрания Центра сохранения Библиотеки и Архива Канады⁴⁰. Задачами этого проекта были: улучшение читаемости текста, усиление видимых характеристик поверхности носителя, оценка состояния железо-галловых чернил и степени их миграции.

Из научных проектов, посвященных анализу пигментов книжных миниатюр с использованием спектрозональной визуализации, отметим масштабный проект, посвященный материаловедческому анализу исламской книжной миниатюры, который реализуется коллективом, объединяющим сотрудников *Художественных музеев Гарварда (Harvard Art Museums)*, *Чикагского центра научных исследований произведений искусства (Northwestern University/Art Institute of Chicago Center for Scientific Studies in the Arts — NU-ACCESS)*, *Центра консервации и технических исследований Штрауса (Straus Center for Conservation and Technical Studies)*. На протяжении нескольких лет было проведено исследование более 50 произведений ближневосточного книжного искусства XIII–XIX вв. из коллекции Художественных музеев Гарварда, а также Виллы Татти во Флоренции (Гарвардский Центр изучения итальянского Возрождения)⁴¹. Исследование состояло из двух этапов. На начальной стадии авторы применяли цифровую **микроротосъемку в УФ- и ИК-диапазонах** избранных фрагментов миниатюр. Исследователи сосредоточились на тех участках красочной поверхности, которые могли дать информацию о художественной технике, методах цветопередачи и использованных красителях. Затем эти изображения были использованы в качестве руководства при проведении РФА и рамановской спектроскопии.

Подводя итоги, отметим, что из постоянно действующих зарубежных научных институций, использующих методы спектрозональной визуализации, самыми результативными оказались Центр изучения рукописных культур Гамбургского университета (CSMC), австрийский центр СИМА и Научно-исследовательский отдел Бодлианской библиотеки Оксфордского университета. Из числа временных проектов выделим исследования, связанные с комплексным изучением палимпсестов (сюда же отнесем и проект по визуализации папирусов из картонажа мумий), а также с оценкой состояния носителя текста, поскольку именно эти работы оказали существенное влияние на развитие метода спектрозональной визуализации на методологическом и техническом уровнях.

Что касается инструментальной базы спектрозональных исследований, то следует в первую очередь отметить важную тенденцию: если в начале 2000-х гг. исследователи применяли в основном готовые системы, созданные для задач, не связанных с изучением объектов рукописного наследия (например, медицинской диагностики, пищевой промышленности, систем навигации), то к началу 2010-х гг.

⁴⁰ Goltz D., Attas M., Cloutis E. et al. Visible (420–720 nm) Hyperspectral Imaging Techniques to Assess Inks in Historical Documents // *Restaurator*. 2009. Vol. 3. P. 199–221.

⁴¹ Knipe P., Eremin K., Walton M. et al. Materials and techniques of Islamic manuscripts // *Heritage Science*. 2018. Vol. 6. Art. 55.

научно-исследовательские отделы учреждений хранения активно приступили к разработке как собственных аппаратных комплексов, так и программного обеспечения для обработки изображений.

Если обобщенно охарактеризовать оборудование, применяемое для спектрально-зональной визуализации, то его разнообразие определяется несколькими основными факторами. Важнейшей характеристикой является количество и ширина спектральных каналов. В этом отношении наблюдается очень большой диапазон от относительно простых систем, позволяющих выделить два-три широких участка спектра (например, с помощью отрезающих светофильтров), до комплексов с десятками или сотнями спектральных каналов, где ширина канала может составлять менее 5 нм. Системы, находящиеся ближе к первым, в основном позиционируются как «мультиспектральные», а подобные вторым позиционируются как «гиперспектральные».

По способам обеспечения спектрально-зональной визуализации можно выделить два основных типа. Один из них составляют системы на основе находящихся перед сенсором светофильтров (подобная система используется, в частности, в Лаборатории кодикологических исследований и научно-технической экспертизы документа (ЛКИиНТЭД) Отдела рукописей Российской национальной библиотеки). Фильтры могут как меняться перед сенсором, так и образовывать мозаику непосредственно на нем, в этом случае происходит одномоментный захват всего объема спектральной информации для каждого пикселя. К другому типу относятся системы, где используется освещение с изменяющимся спектральным диапазоном, которое, как правило, обеспечивается светодиодами панелями с узкополосными светодиодами различных длин волн (подобную систему использует, например, СИМА). Особняком стоят некоторые гиперспектральные системы с использованием призм.

В большинстве случаев используемые при изучении памятников письменности установки работают в спектральном диапазоне от 350–400 до 1100 нм. В таких установках имеются кремниевые матрицы. Тем не менее в ряде случаев применяются установки с существенно большими возможностями в ближней инфракрасной области спектра — 1400 нм и выше. В таких установках используются специальные SWIR-сенсоры.

Используются как системы, осуществляющие сканирование тем или иным способом (наиболее распространено линейное сканирование — «push broom»), так и захватывающие объект одним кадром.

Характеризуя связь методов и конкретных исследовательских задач, отметим, что съемка в УФ-освещении, активно применявшаяся при изучении рукописных памятников с начала XX в., сейчас самостоятельно используется достаточно редко, главным образом для визуализации нижних слоев палимпсестов и приемов наложения и составления красок в книжных миниатюрах. Мульти- и гиперспектральная съемка используются с начала 2000-х гг. преимущественно для определения типа чернил. Эта задача важна для консервации (предупреждение коррозии и миграции чернил), а также для визуализации маркировочных знаков бумаги. Мультиспектральная съемка наиболее часто практикуется для улучшения читаемости текстов, а также для визуализации водяных знаков. Области применения гиперспектральной съемки — это улучшение читаемости текстов, контроль характеристик поверхности носителя (пергамента и бумаги) и ее взаимодействия с красителя-

ми (чернилами). Еще одной задачей, выполняемой с помощью гиперспектральной визуализации, является неразрушающая идентификация пигментов книжных миниатюр (в сочетании с рамановской спектроскопией и РФА).

Таким образом, спектрозональная съемка используется как для решения диагностической задачи восстановления первоначального состояния памятника, так и (в подавляющем большинстве проектов) для сугубо утилитарных задач: визуализации нижних слоев палимпсестов, маркировочных знаков бумаги (с маскированием текста), прочтения закрашенных и выцветших записей, обнаружения подрисовок и изменений первоначального эскиза в миниатюрах, заставках и т. п. Очевидно, что в XXI столетии решение подобных задач стало рутинной техникой, и специально рассматривать их в рамках исследовательских статей не имеет смысла. Типовые системы визуализации для архивных материалов, как мы видим, начали создаваться повсеместно, так, как это происходило в криминалистике, где вопрос поточного исследования объектов давно решен.

Стандартными перечисленные задачи являются и для отечественных специалистов, прежде всего для сотрудников ЛКИиНТЭД Отдела рукописей Российской национальной библиотеки, которую можно считать методическим центром в области применения спектрозональных методов к исследованию памятников древнерусской письменности в нашей стране. Так, метод съемки филиграней в ближней инфракрасной области спектра был разработан лабораторией еще в 1992 г.⁴², а с 1998 г. до настоящего времени продолжается систематическая публикация снимков филиграней, полученных с помощью спектрозональных телевизионных систем. ЛКИиНТЭД ведет практическую работу, в частности в такой востребованной в науке о рукописях области, как «реконструкция» поврежденных (подвергавшихся удалению) записей и фрагментов текста.

Справедливым кажется вопрос о том, существует ли у спектрозональной визуализации как метода потенциал. Технический потенциал развития метода видится в повышении чувствительности камер для получения более точной спектральной информации. Исследовательские возможности метода также не исчерпаны. Например, он может использоваться для анализа спектрального поведения *вещества* при определении состава красителя, примером чему могут служить продолжающиеся исследования исторических чернил, проводимые Центром изучения рукописных культур в Гамбурге, во многом основанные на идеях, высказанных французской исследовательницей М. Зердун⁴³. Еще один путь развития метода — в исследованиях, посвященных анализу спектрального поведения *текста*, выполненного разными чернилами, а также нацеленных на изучение навыков письма. Здесь у российских специалистов существует серьезный задел — это работы, выполнявшиеся по научной программе проекта РФФИ «Текст и краситель: историко-материаловедческое исследование красителей текста древнерусских рукописных книг XIV–XVII вв.». В рамках этих исследований, в частности, удалось продемонстрировать возможности визуализации в ближней инфракрасной области спектра для выявления особенностей письменного навыка, отразившегося в исследуемом документе: частоты

⁴² Tsyarkin D. O. Optico-Electronic Methods in the Study of Mediaeval Paper in the Manuscript Division of the National Library of Russia // *Bibliologia: elementa ad librorum studia pertinentia*. Vol. 19: Le papier au Moyen Age: histoire et techniques. Turnhout, 1999. P. 243–253.

⁴³ Zerdoun Bat-Yehouda M. *Les encres noires au Moyen-Âge: jusqu'à 1600*. Paris, 1983.

заправок пера, особенностей контакта письменного орудия с писчим материалом. Крайне важные результаты для текстологии может дать выявление различий в спектральном поведении различных участков текста, которое может свидетельствовать об этапах работы (например, о так называемых «писцовых уроках») и внесении правок⁴⁴.

Перспективным направлением, в котором можно достичь больших результатов, является также контроль состояния и динамики процессов носителя рукописных памятников (пергамена, бумаги и др.). За рубежом для решения этих задач в настоящее время активно применяется гиперспектральная визуализация. Таким образом, если в исследовании чернил отечественные специалисты находятся на хороших позициях, то направление, связанное с изучением носителя, требует дальнейшего освоения. Многообещающим в этом отношении может стать решение таких задач, к которым уже приступили исследователи, как контроль сортовых характеристик бумаги (оптической плотности, проницаемости), анализ спектральных характеристик включений и контроль проклейки.

References

- Afif N., Bhayro S., Pormann P.E., Sellers W.I., Smelova N. Analyzing images, editing texts. The Manchester Project, *Manuscript Studies: A Journal of the Shoenberg Institute for Manuscript Studies*, 2018, vol. 3, iss. 1, pp. 155–184.
- Alexeeva A. N., Lyakhovitsky E. A., Tsytkin D. O., Simonova E. S., Sirro S. V., Tsytkin D. O., Shibaev M. A. Proekt kompleksnogo issledovaniia drevnerusskikh chernil: pervyie rezultaty, *Vspomogatelnye istoricheskiye distsipliny v sovremennom nauchnom znanii: materialy 33 mezhduнародnoi konferentsii*. Moscow, Institute of World History Publ., 2020, pp. 47–48. (In Russian)
- Almogi O., Kindzorra E., Hahn O., Rabin I. Inks, pigments, paper in quest of unveiling the history of the production of a Tibetan Buddhist manuscript collection from the Tibetan-Nepalese borderlands. *Journal of the International Association of Buddhist Studies (JIABS)*, 2015, vol. 36-37, pp. 93–117.
- Bai D., Messenger D. W., Howell D. Hyperspectral analysis of cultural heritage artifacts: pigment material diversity in the Gough Map of Britain. *Optical Engineering*, 2017, vol. 56, iss. 8, art. 081805. <https://doi.org/10.1117/1.OE.56.8.081805>
- Balachenkova A. P., Tsytkin D. O. Vozmozhnosti tekhnologicheskogo analiza istoricheskikh bumag v istochnikovedcheskom issledovanii pamyatnikov. *Vestnik of St. Petersburg University. History*, 2017, vol. 62, iss. 2, pp. 375–399. (In Russian)
- Bosch S., Colini C., Hahn O., Janke A., Shevchuk I. The Atri fragment revisited. I: Multispectral imaging and ink identification. *Manuscript Cultures*, 2018, vol. 11, pp. 141–156.
- Brenner S., Sablatnig R., Cappa F., Vetter W., Frühmann B., Schreiner M., Miklas H. Virtual conservation and restoration via multispectral imaging and spectroscopy, *Issledovaniie i restavratsiia rukopisei: materialy konferentsii–2019*. St. Petersburg, Library of RAS Publ., 2020, pp. 15–27.

⁴⁴ См. Ляховицкий Е. А., Цыткин Д. О. Инфракрасная визуализация текста в изучении памятников древнерусской письменности // Историческая информатика. 2019. № 4. С. 148–156. URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=31588 (дата обращения: 10.07.2020); Быстрова Е. С., Лоцманова Е. М., Ляховицкий Е. А. и др. Древнерусские чернила в системе письменной культуры: проблемы и перспективы исследования // Комплексный подход в изучении Древней Руси: сб. материалов 10-й междунар. науч. конф. Прилож. к журн. «Древняя Русь. Вопросы медиевистики». М., 2019. С. 43–44; Алексеева А. Н., Ляховицкий Е. А., Симонова Е. С. и др. Проект комплексного исследования древнерусских чернил: первые результаты // Вспомогательные исторические дисциплины в современном научном знании: материалы 33-й международной научной конференции. М, 2020. С. 47–48.

- Bystrova E.S., Lotsmanova E.M., Lyakhovitsky E.A., Polyakov I.A., Simonova E.S., Tsyarkin D.O. Drevnerusskie chernila v sisteme pis'mennoi kultury: problemy i perspektivy issledovaniia. *Kompleksnyi podkhod v izuchenii Drevnei Rusi: sbornik materialov 10 mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*, Moscow, Indrik Publ., 2019, pp. 43–44. (In Russian)
- Colini C., Hahn O., Bonnerot O., Steger S., Cohen Z., Ghigo T., Christiansen T., Bicchieri M., Biocca P., Krutzsch M., Rabin I. The quest for the mixed inks. *Manuscript Cultures*, 2018, vol. 11, pp. 41–48.
- Delaney J.K., Ricciardi P., Glinesman L., Facini M., Thoury M., Palmer M., de la Rie E.R. Use of imaging spectroscopy, fiber optic reflectance spectroscopy, and X-ray fluorescence to map and identify pigments in illuminated manuscripts. *Studies in Conservation*, 2014, vol. 59, no. 2, pp. 91–101.
- Easton R.L., Kelbe D. Statistical processing of spectral imagery to recover writings from erased or damaged manuscripts. *Manuscript Cultures*, 2012, vol. 7, pp. 35–46.
- Easton R.L., Knox K.T., Christens-Barry W.A. Multispectral imaging of the Archimedes palimpsest. *32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 2003: Proceedings*, pp. 111–116. <https://doi.org/10.1109/AIPR.2003.1284258>
- Easton R.L., Knox K.T., Christens-Barry W.A., Boydston K. Spectral imaging methods applied to the Syriac Galen Palimpsest. *Manuscript Studies: A Journal of the Schoenberg Institute for Manuscript Studies*, 2018, vol. 3, iss. 1, pp. 69–82.
- Easton R.L., Noël W. The multispectral imaging of the Archimedes Palimpsest. *Gazette du livre medieval*, 2004, iss. 45, pp. 39–49.
- Gau M., Miklas H., Lettner M., Sablating R. Image acquisition and processing routines for damaged manuscripts. *Digital Medievalist*, 2011, iss. 6. <https://doi.org/10.16995/dm.25>
- Ghigo T., Rabin I. Gaining Perspective into the Materiality of Manuscripts: The Contribution of Archaeometry to the Study of the Inks of the White Monastery Codices. *Coptic Literature in Context (4th — 13th cent.): Cultural Landscape, Literary Production, and Manuscript Archaeology*, Roma, 2020, pp. 273–282.
- Ghigo T., Bonnerot O., Buzi P., Krutzsch M., Hahn O., Rabin I. An attempt at a systematic study of inks from Coptic manuscripts. *Manuscript Cultures*, 2018, vol. 11, pp. 157–164.
- Ghigo T., Rabin I. Gaining Perspective into the materiality of manuscripts: the contribution of archaeometry to the study of the inks of the White Monastery codices. *Coptic literature in context (4th — 13th cc.): Cultural landscape, literary production, and manuscript archaeology*. Roma, Quazar, 2020, pp. 273–282.
- Ghigo T., Bonnerot O., Buzi P., Krutzsch M., Hahn O., Rabin I. An Attempt at a Systematic Study of Inks from Coptic Manuscripts. *Manuscript Cultures*, 2018, vol. 11, pp. 157–164.
- Gibson A., Piquette K.E., Bergmann U., Christens-Barry W., Davis G., Endrizzi M., Fan Sh., Farsiou S., Fitzgerald A., Griffiths J., Jones C., Li G., Manning P.L., Maughan Jones Ch., Mazza R., Mills D., Modregger P., Munro P.R.T., Olivo A., Stevenson A., Venugopal B., Wallace V., Wogelius R.A., Toth M.B., Terras M. An assessment of multimodal imaging of subsurface text in mummy cartonnage using surrogate papyrus phantoms. *Heritage Science*, 2018, vol. 6, art. 7. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0175-4>
- Goltz D., Attas M., Cloutis E., Young G., Begin P. Visible (420–720 nm) hyperspectral imaging techniques to access inks in historical documents. *Restaurator*, 2009, iss. 30, pp. 199–221.
- Havermans J., Abdul Aziz H., Scholten H. Non destructive detection of iron gall inks by means of multispectral imaging. Part 1: Development of the detection system. *Restaurator*, 2003, vol. 24, iss. 1, pp. 55–60.
- Havermans J., Abdul Aziz H., Scholten H. Non destructive detection of iron gall inks by means of multispectral imaging. Part 2: Application on original objects affected with iron-gall-ink corrosion. *Restaurator*, 2003, vol. 24, iss. 2, pp. 88–94.
- Howell D. The potential of hyperspectral imaging for researching colour on artefacts. *Digital imaging of artefacts: Developments in methods and aims*. Oxford, Archaeopress, 2018, pp. 37–48.
- Janke A., McDonald C. Multispectral imaging of the San Lorenzo Palimpsest (Florence, Archivio del Capitolo di San Lorenzo, Ms. 2111). *Manuscript Cultures*, 2012, vol. 7, pp. 113–125.
- Kalashnikova A.A. Tekhnika s'iomki russkikh aktov 15–17 vekov v blizhnem infrakrasnom diapazone. *Fotografiia. Izobrazheniie. Dokument*, iss. 9, St. Petersburg, Rosphoto Publ., 2020, pp. 42–46.
- Keckskeméti I., Seppälä M. False-colour infrared (FCIR) imaging: an inexpensive method for identifying iron-gall ink by standard digital camera. *Papierrestaurierung*, 2007, vol. 7, iss. 1, pp. 18–21.

- Knipe P., Eremin K., Walton M., Babini A., Rayner G. Materials and techniques of Islamic manuscripts. *Heritage Science*, 2018, vol. 6, art. 55. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0217-y>
- Kogou S., Neate S., Coveney C., Miles A., Boocock D., Burgio L., Cheung C. S., Liang H. The origins of the Selden map of china: scientific analysis of the painting materials and techniques using a holistic approach. *Heritage Science*, 2016, vol. 4, art. 28. <http://doi.org/10.1186/s40494-016-0098-x>
- Liang H. Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 2012, vol. 106, pp. 309–323.
- Lyakhovitsky E. A., Tsyppkin D. O. Infrakrasnaia vizualizatsiia teksta v izuchenii pamiatnikov drevnerusskoi pis'mennosti. *Istoricheskaia Informatika*, 2019, no 4, pp. 148–156 (In Russian).
- Mahgoub H., Chen H., Gilchrist J. R., Fearn T., Strlič M. Quantitative chemical near-infrared hyperspectral imaging of Islamic paper. *ICOM-CC 18th Triennial Conference Preprints, (Copenhagen, 4–8 September 2017)*. Paris, International Council of Museums, art. 1606.
- Maybury I. J., Howell D., Terras M., Viles H. Comparing the effectiveness of hyperspectral imaging and Raman spectroscopy: a case study on Armenian manuscripts. *Heritage Science*, 2018, vol. 6, art. 42. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0206-1>
- Miklas H., Brenner M., Sablatnig R. Multispektralnaia s'emka dlia tsifrovoy restavratsii drevnix rukopisei: ustroistva, metody i prakticheskie aspekty. *Istoricheskaia Informatika*, 2017, no 3, pp. 166–174. (In Russian)
- Nosnitsin D., Kindzorra E., Hahn O., Rabin I. A “Study manuscript” from Qäqäma (Təgray, Ethiopia): Attempts at ink and parchment analysis. *Comparative Oriental Manuscript Studies Newsletter*, 2014, iss. 7, pp. 28–31.
- Padoan R., Steemers Th. A. G., Klein M. E., Aalderink B. J., de Bruin G. Quantitative hyperspectral imaging of historical documents: technique and applications. *9th International Conference on NDT of Art: Conference Papers*, Jerusalem, 2008.
- Rabin I., Schütz R., Kohl A., Wolff T., Tagle R., Pentzien S., Hahn O., Emmel S. Identification and classification of historical writing inks in spectroscopy. *Comparative Oriental Manuscript Studies Newsletter*, 2012, iss. 3, pp. 26–30.
- Ricciardi P., Delaney J. K., Glinsman L., Thoury M., Facini M., de la Rie E. R. Use of visible and infrared reflectance and luminescence imaging spectroscopy to study illuminated manuscripts: pigment identification and visualization of underdrawings. *Proceedings of SPIE*, 2009, vol. 7391, <https://doi.org/10.1117/12.827415>
- Snijders L., Zaman T., Howell D. Using hyperspectral imaging to reveal a hidden precolonial Mesoamerican codex. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, iss. 9, pp. 143–149.
- Sorbello Staub A., Staub J., Richter I., Birringer M. Near-infrared laser scanning (NILS) to differentiate historical inks, deployed on a stained and faded ninth-century fragment of Boethius reused as binding material: Proving a concept. *Restaurator*, 2016, vol. 37, iss. 1, pp. 1–13.
- Toth M. B. Pulling it all together. Managing the Syriac Galen Palimpsest Project. *Manuscript Studies: A Journal of the Schoenberg Institute for Manuscript Studies*, 2018, vol. 3, iss. 1, pp. 9–32.
- Tsyppkin D. O. Nauka nabliudeniia: ekspertnyi podkhod v izuchenii rukopisnoi knigi, *Trudy Otdela Drevnerusskoi Literatury*, vol. 65. St. Petersburg, Rostok Publ., 2017, pp. 151–180. (In Russian)
- Tsyppkin D. O. Optico-Electronic methods in the study of mediaeval paper in the Manuscript Division of the National Library of Russia. *Bibliologia: elementa ad librorum studia pertinentia*, vol. 19: Le papier au Moyen Age: histoire et techniques. Turnout, 1999, pp. 243–253.
- Tsyppkin D. O. Ot issleduiushei fotografii k istoriko-dokumentnoi ekspertize. *Trudy ob'edinennogo nauchnogo soveta po gumanitarnym problemam i istoriko-kul'turnomu naslediiu*. St. Petersburg, Nauka Publ., 2011, pp. 163–184. (In Russian)
- Tsyppkin D. O., Tereschenko E. Yu., Balachenkova A. P., Vasiliev A. L., Lyakhovitsky E. A., Yatsishina E. B., Kovalchuk M. V. Comprehensive studies of inks in Old Russian manuscripts. *Nanotechnologies in Russia*, 2020, vol. 15, iss. 5, pp. 579–587.
- Ukhanova E. V., Zhizhin M. N., Andreev A. V., Poida A. A. Estestvennonauchnye i traditsionnye metody v issledovanii Khludovskogo glagolicheskogo palimpsesta 11 veka (SHM, Khlud. 117). Predvaritelnye rezultaty. *Studi Slavistici*, 2018, vol. 15, iss. 2, pp. 5–38.

- Wijsman S., Neate S., Kogou S., Liang H. Uncovering the Oppenheimer Siddur: using scientific analysis to reveal the production process of a medieval illuminated Hebrew manuscript. *Heritage Science*, 2018, vol. 6, art. 15. <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0179-0>
- Zekrgoo S. Methods of Creating, Testing and Identifying Traditional Black Persian Inks. *Restaurator*, 2014, vol. 35, iss. 2, pp. 133–158.
- Zerdoun Bat-Yehouda M. *Les encres noires au Moyen-Âge: jusqu'à 1600*. Paris, CNRS, 1983, 439 p.

Статья поступила в редакцию 19 августа 2020 г.

Рекомендована в печать 25 мая 2021 г.

Received: August 19, 2020

Accepted: May 25, 2021