

УДК 930.272:681.7.015.2

DOI 10.25205/1818-7919-2020-19-8-117-127

Применение методов инфракрасной визуализации в современном источниковедении

А. А. Калашникова

*Санкт-Петербургский институт истории РАН
Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация

В статье представлен анализ применения методов инфракрасной визуализации в источниковедении и искусствоведении для исследования письменных исторических источников и предметов изобразительного искусства (термография, ИК-рефлектография, съемка в ближнем ИК-диапазоне, мультиспектральный и гиперспектральный анализ). Эти методы позволяют восстанавливать плохо читаемые тексты и изображения, расшифровывать палимпсесты, выявлять правку в тексте, получать точные снимки филиграней. Автор акцентирует внимание на актуальности съемки бумажных документов и кодексов в ближнем ИК-диапазоне как элемента базового источниковедческого анализа, позволяющего получить изображения водяных знаков, а также выявить следы правки текста или его фальсификацию. В статье представлены технические рекомендации по сборке простейшего оборудования для съемки материалов исследования в ближнем ИК-диапазоне.

Ключевые слова

филигранология, инфракрасная визуализация, водяные знаки, рефлектография, термография, манускрипты, мультиспектральный анализ, гиперспектральный анализ

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-39-90053

Для цитирования

Калашникова А. А. Применение методов инфракрасной визуализации в современном источниковедении // Вестник НГУ. Серия: История, филология. 2020. Т. 19, № 8: История. С. 117–127. DOI 10.25205/1818-7919-2020-19-8-117-127

Use of Infrared Imaging in Contemporary Source Studies

A. A. Kalashnikova

*St. Petersburg Institute of History of the RAS
St. Petersburg, Russian Federation*

Abstract

The paper gives a brief overview of infrared (IR) imaging techniques and the cases of their applying to the study of ancient manuscripts and objects of cultural heritage. The method of IR reflectography is used in fine art research, which allows the visualization of details hidden by the paint layers with the help of a scanner. There are also the cases, when IR reflectography is implemented into papyrology with the purpose to make ancient papyri, that turned dark-brown, more legible. Thermography is also used both in studies of cultural heritage and written documents, such as research of bookbinding and supports. Multispectral analysis is a well-proven method of text visualization and digital restoration of ancient manuscripts, which usually is applied in palimpsest decipher. Then the paper considers the method that includes part of IR spectrum is hyperspectral analysis. It is also used in papyrology. Finally, the author observed method of near-infrared imaging (NIRI) and its use for different purposes of the source studies. The paper concludes by arguing the relevance of near-infrared analysis of paper-based historical documents as a key-element of source study. NIRI allows researchers to obtain digital copies of watermarks and investigate corrections of the text made with different inks. The

paper provides reader with the technical recommendations on basic NIRI equipment. To sum up, the author declares that there is a possibility for NIRI to become an everyday routine practice for researchers in near future due to its ability to provide a basic analysis of paper, watermarks and ink.

Keywords

watermarks, infrared visualization, ancient manuscripts, reflectography, thermography, hyperspectral analysis, multi-spectral analysis

Acknowledgements

The reported study was funded by RFBR, project number 19-39-90053

For citation

Kalashnikova A. A. Use of Infrared Imaging in Contemporary Source Studies. *Vestnik NSU. Series: History and Philology*, 2020, vol. 19, no. 8: History, p. 117–127. (in Russ.) DOI 10.25205/1818-7919-2020-19-8-117-127

Различные исследовательские методики с применением инфракрасного (ИК) излучения успешно используются в самых разных дисциплинах, в том числе в искусствоведении и источниковедении. Хотя основы метода ИК-визуализации были разработаны почти 100 лет назад [Clark, 1939], они и по сей день остаются востребованы учеными. В статье будет представлен анализ таких неразрушающих методов исследования в ИК-диапазоне, как рефлектография, термография, мультиспектральный и гиперспектральный анализ, а также визуализация в ближнем ИК-диапазоне.

В источниковедении ИК излучение еще с конца 1950-х гг. используется для визуализации утраченных фрагментов текста и снимков водяных знаков. Д. П. Эрастов в Лаборатории консервации и реставрации документов АН СССР разрабатывал методы фотоанализа для выявления угасших текстов (спектрозональное фотографирование, фотографирование в ультрафиолетовых, инфракрасных лучах, видимой и инфракрасной люминесценции), а также занимался контактной бета-радиографией для воспроизведения филигранных [Эрастов, 1958; 1960; 1963]. В статье мы остановимся на методах, применяемых в течение последнего двадцатилетия, когда широкое использование получили цифровые камеры и компьютерные технологии. Поскольку многие современные методики исследования, в том числе с использованием ИК-излучения, применяются в разных дисциплинах, нам кажется полезным включить в статью несколько кейсов из искусствоведения, аналитический инструментарий которого наиболее близок источниковедению.

В анализе живописных произведений ИК-визуализация успешно применяется благодаря тому, что некоторые пигменты прозрачны в ИК-волнах. Прозрачность пигментов зависит от того, как пигмент поглощает свет, и того, как частицы пигмента свет рассеивают. Эффект рассеивания зависит от коэффициентов преломления пигмента и связующего вещества краски. Краски, у которых связующее вещество и пигмент имеют равные или близкие показатели преломления, прозрачны. И наоборот, чем больше разница этих коэффициентов, тем больше кроющая способность краски. Электромагнитные волны, которые имеют длину больше, чем у волн видимого спектра, меньше подвержены эффекту рассеивания. Поэтому в ИК-спектре некоторые краски становятся прозрачными, что позволяет раскрывать наслоения в живописных произведениях и исследовать изменения композиции. Например, благодаря тому что у графита высокая степень поглощения, в ИК-спектре под слоями краски иногда можно обнаружить карандашные наброски или подписи [Gavrilov et al., 2014. P. 344–346; Alexopoulou, Kaminari, 2014. P. 62–65].

ИК-визуализация успешно применяется и при работе с письменными историческими источниками. Чернила, которые в видимом спектре имеют очень схожие фотометрические характеристики, в ИК-спектре различаются [Psarrou et al., 2011. P. 138]. Прозрачность железо-галловых чернил возрастает, а углеродные чернила, поглощающие ИК-излучение, напротив, становятся более видимыми. Железо-галловые чернила с различным химическим составом также по-разному выглядят в ИК-спектре, что наглядно визуализируется с помощью гистограмм. Прозрачность железо-галловых чернил используется для того, чтобы получать снимки филигранных, свободные или почти свободные от текста [Tsyarkin, 1999. P. 245], а не-

прозрачность углеродных чернил – для выявления угасающего текста [Gargano et al., 2014. P. 518]. ИК-визуализация применяется также для расшифровки палимпсестов [Кнох, 2008], для выявления исправлений и фальсификаций текста [Ляховицкий, Цыпкин, 2019. С. 154–155], для анализа техники письма [Там же. С. 151–153; Psarrou et al., 2011], для расшифровки изображений и текстов, находящихся под чернильными пятнами [Kim et al., 2011].

В исследованиях объектов культурного наследия используются: ближняя инфракрасная область спектра (NIR) с длиной волны 0,74–1,1 мкм, коротковолновая (SWIR) с длиной волны 1,1–2,5 мкм и средняя (MWIR) с длиной волны 2,5–50 мкм [Gavrilov et al., 2014. P. 344; Orazi, 2020. P. 2].

Для исследований живописи применяется ИК-рефлектография, которая позволяет воссоздать точную карту поновлений картины и увидеть наброски, находящиеся под слоями краски. Для этих целей создаются специальные сканеры, работающие в коротковолновом диапазоне (1–2 мкм) [Consolandi, Bertani, 2007. P. 239]. В основе многих рефлектографических систем лежат PbS-видиконы (передающие телевизионные трубки) [Consolandi, Bertani, 2007]. Эта система была разработана еще в 1960-х гг.; более современным является сенсорное оборудование, основанное на использовании датчиков InGaAs. Сегодня также ведутся и новые разработки по созданию рефлектографических сканеров. Так, Исследовательский центр Фраскати (Италия) занимается разработкой лазерного ИК-сканера, независимого от системы освещения и не требующего дополнительного монтажа специальных конструкций, который мог бы производить съемку произведений изобразительного искусства на расстоянии 5–10 м [Seccarelli et al., 2018].

ИК-рефлектография, но в ближнем диапазоне, применяется также при изучении письменных источников – это распространенный метод анализа, практикуемый исследователями, изучающими папирусы. Папирус темнеет со временем, и написанное на нем в видимом спектре становится неразличимо, но благодаря тому, что углеродсодержащие чернила, использовавшиеся для письма на папирусе, поглощают ИК-излучение, тексты становятся возможно прочесть [Gargano et al., 2014. P. 518].

К работе в среднем ИК-диапазоне относится ИК-термография, применяемая в исследовании предметов искусства и объектов культурного наследия. Термография нацелена на анализ свойств, структур и состояний тестируемых образцов путем анализа их температуры и температурной динамики; а ИК-термография основана на обнаружении инфракрасного излучения от тестируемого объекта. Это излучение улавливается при помощи датчика, анализируется и предоставляется исследователю в виде картины распределения температурных полей [Gavrilov et al., 2014. P. 350]. Термографическая установка состоит из камеры (тепловизора), источника теплового возбуждения и компьютера для визуализации и обработки данных. Иногда ИК-термография используется при исследовании древних кодексов, в частности их переплетов, позволяя получить информацию о структуре и повреждениях переплета, например, от древесного червя, а также о способах крепления к нему тетрадей, без расплетения рукописи. Термография также применяется при изучении таких переплетов, для укрепления которых использовались фрагменты более ранних книг, и позволяет прочесть эти тексты, не прибегая к разрушению переплета [Orazi, 2020. P. 4–5]. Наконец, термография применяется для визуализации текстов, поврежденных водой. Благодаря разнице температурных значений участков, покрытых и не покрытых чернилами, текст становится более читаемым [Ibid. P. 8].

ИК-визуализация является составной частью мультиспектрального (MSI) и гиперспектрального анализов. Мультиспектральный анализ применяют для реконструкции текстов манускриптов плохой сохранности, создавая серии изображений одного и того же объекта с использованием различных узких полос электромагнитного спектра [Миклас и др., 2017; Giacometti et al., 2015.]. Использование нескольких узких спектральных полос позволяет обнаруживать различную реакцию писчих материалов на конкретные длины волн, которые либо невидимы, либо неразличимы человеческим глазом. Полученные снимки при помощи про-

граммного обеспечения затем собираются в единое изображение, представляющее собой цифровую реконструкцию текста плохой сохранности. На мультиспектральном анализе и цифровой реставрации сегодня специализируется Межвузовский центр изображений и анализа материалов в культурном наследии (The Centre of Image and Material Analysis in Cultural Heritage (CIMA)) (Вена, Австрия), основанный в 2014 г.¹

Наиболее ранний и один из самых известных проектов, в котором успешно использовался мультиспектральный анализ, – исследование палимпсестов Архимеда 2007 г.² В 1998 г. манускрипт XIII в. на 177 листах, содержащий литургические тексты, был продан из частной коллекции и передан на хранение в Художественный музей Уолтерс (Балтимор, США), после чего началось его научное исследование и реставрация. Палимпсест был написан железно-галловыми чернилами, поэтому при исследовании наиболее результативной оказалась съемка в ультрафиолетовой части спектра и рентгенофлуоресцентный анализ. Ученые обнаружили под слоем текста XIII в. ранее неизвестные стертые тексты X в.: два трактата Архимеда («Метод» и «Стомахийон»), речи Гиперида и комментарий к «Категориям» Аристотеля [Кнох, 2008].

Ближняя (и иногда коротковолновая) часть ИК-спектра захватывается гиперспектральными камерами. В гиперспектральном (HSI) анализе визуализация выполняется за счет захвата очень узкой спектральной полосы электромагнитного излучения (меньше 0,01 мкм), когда фильтр помещается перед источником света и блокирует все, кроме выбранной полосы электромагнитного спектра. Это позволяет собирать больше информации об объекте с высокой степенью дискретности. Результатом измерений является так называемый гиперспектральный куб данных, который содержит одно изображение спектральной отражательной способности для каждого диапазона длин волн [Padoan et al., 2008].

Гиперспектральный анализ позволяет получать подробные количественные измерения спектральной отражательной способности документа в видимой и невидимой (ультрафиолетовой и инфракрасной) части спектра [Kim et al., 2011]. Эти данные важны для консервации документа, оценки его повреждений, а также для анализа отдельных характеристик документа, таких как, например, чернила и пигменты.

В качестве примера успешного применения гиперспектрального анализа можно упомянуть исследования папируса из «могилы музыканта» 420/430 гг. до н. э., обнаруженной в 1981 г. в ходе археологических раскопок в Афинах. Этот папирус является древнейшим греческим текстом, найденным на территории Греции. Ранее считалось, что он не подлежит транскрибированию и восстановлению; он превратился в массу полусгнивших волокон, сложенную в несколько слипшихся слоев. Лаборатория физических и химических методов диагностики и документирования (Laboratory of Physical and Chemical Methods for Diagnosis and Documentation) Технологического образовательного института Афин (Technological Educational Institute of Athens) в 2012 г. исследовала папирус с целью выявить текст на нижних спрессованных слоях. В работе использовался гиперспектральный анализ, дополненный основным компонентным анализом (PCA)³, который решал проблему разделения информации, находящейся на разных слоях [Alexoroulou, Kaminari, 2014. С. 65–76]. В результате исследования удалось распознать фрагменты текста и ноты.

Схожие методы работы используются в новейших исследованиях папирусов Геркуланума. Эти папирусы были найдены во время раскопок середины XVIII в., а затем наклеены на бумажную основу при помощи особого механизма (машины Пьяджо). Все, что было написано на обороте этих источников, известно нам только по транскрипциям рисовальщиков, сделанным во время раскопок. Отклеить папирусы от бумажной основы не представляется возможным. Папирусы Геркуланума исследовались в ближнем ИК-диапазоне, что позволило улучшить

¹ URL: <http://hrsm.caa.tuwien.ac.at/> (дата обращения 25.04.2020).

² Официальный сайт проекта. URL: <http://www.archimedespalimpsest.org/> (дата обращения 25.04.2020).

³ Основной компонентный анализ (PCA) – метод неконтролируемого машинного обучения. Используется также для обработки мультиспектральных изображений [Миклас и др., 2017].

прочтение текста на лицевой стороне. Однако излучения в ближнем диапазоне оказалось недостаточно для прочтения оборотной стороны папируса. Поэтому исследователи применили гиперспектральный анализ в коротковолновом диапазоне в сочетании с основным компонентным анализом. Названные методики позволили ученым выявить неизвестные ранее участки оборотной стороны выбранного для исследования папируса, заполненные текстом [Tournié et al., 2019]. Исследователям еще предстоит расшифровать обнаруженные фрагменты текста, как и изучить другие папирусы Геркуланума.

Как правило, над изучением исторических источников с помощью современных технологий сегодня работают междисциплинарные исследовательские коллективы, использующие сложное и дорогостоящее оборудование. Однако существуют менее затратные и более доступные методики, которые могут применяться в повседневной работе с рукописями. Работа в ближней ИК-области спектра – наиболее простой и не требующий значительных финансовых затрат метод ИК-визуализации. Так, например, широко используемое до настоящего времени ручное калькирование филиграней может быть заменено на съемку в ближнем ИК-диапазоне.

Определение водяного знака обычно осложнено текстом, находящимся на поверхности бумаги. Ручная прорисовка водяного знака с помощью кальки не только не может создать его точной копии [Лютов, Лютова, 2014. С. 72; Шибаев, 2013. С. 19], но и не может указать его точного положения относительно сетки листоотливной формы. Фотографирование филигранны на просвет в видимой части спектра также уступает съемке в ближнем ИК-диапазоне, поскольку в результате на получаемом изображении часть филигранны будет скрыта текстом. Визуальное сопоставление прорисовок с изображениями в альбомах филиграней, которые также копировались составителями вручную, затрудняет отождествление филиграней. Съемка в ближнем ИК-диапазоне позволяет получить изображение не только филигранны, но и сетки листоотливной формы, которое также может быть информативно. Частота вержеров, толщина понтюзо⁴, следы ремонта сетки, положение филигранны по отношению к ней – это те элементы, которые сложно учесть при калькировании филиграней вручную.

Сегодня на смену печатным альбомам приходят электронные базы данных [Ляховицкий, 2011. С. 38; Шибаев, 2013. С. 19]. Наиболее крупный проект, объединяющий 45 баз данных и около 200 000 филиграней – «Bernstein – The Memory of Paper»⁵. В 2014 г. в проекте появилась база данных Отдела рукописей Государственного исторического музея [Уханова, Бережная, 2015]. На портале в свободном доступе находится программное обеспечение для измерения и выгрузки водяных знаков, позволяющее любому пользователю обрабатывать свои снимки и создавать базы данных.

По сравнению с другими методами копирования филиграней, такими как бета-радиография, гамма-радиография и метод Т. Грэвела, ИК-съемка не требует от исследователя наличия специальной квалификации, сложных в использовании инструментов и трудоемких приемов копирования, наконец, отдельного стационарного оборудованного места работы. Преимуществом ИК-съемки филиграней над другими методами является также возможность работы с большими массивами документов [Шибаев, 2013. С. 20].

Съемка филиграней в ближнем ИК-диапазоне относительно простая операция, и подбор оборудования для этой цели не должен вызвать затруднений у исследователя. Для простейшей установки необходима камера без префильтра, отсекающего ИК-излучение. Для этого можно переделать обычную цифровую камеру, механически удалив ИК-блокирующий фильтр и фильтр Байера перед сенсором [Миклас и др., 2017; Уханова и др., 2019]. Также можно использовать камеры, применяемые в астрономии (например, QHY 163m) [Ляховицкий, Цып-

⁴ Вержеры и понтюзо – это следы, видимые на просвет, оставленные сеткой листоотливной формы на листе готовой бумаги: понтюзо – держатели сетки, на листе оставляющие след в виде редких вертикальных линий, находящихся на расстоянии 2–2,5 см; вержеры – более частые линии, пересекающие понтюзо под прямым углом.

⁵ Официальный сайт проекта. URL: https://memoryofpaper.eu/BernsteinPortal/appl_start DISP (дата обращения 25.04.2020).

кин, 2019. С. 150], машинном зрении (например, Basler ace), в системах видеонаблюдения (например, ELP). Астрокамеры не имеют в комплекте объектива, но с ними можно использовать фотообъективы, подсоединив их через переходник. Также необходим штатив и система крепления на него камеры. Для компактных камер можно использовать маленькие настольные штативы, для камер больших размеров подойдет фотоштатив с горизонтальной центральной штангой и встроенным уровнем (например, Manfrotto MK190XPRO4-3W). В случае если существует возможность оборудовать стационарное место работы, в качестве штатива удобно использовать редукторную колонну (например, Manfrotto 131TC). Необходимо также ИК-фильтр с полосой пропускания от 0,95–0,97 мкм и держатель для него, который позволит прикрепить фильтр к объективу (например, Cokin). Наконец, для съемки необходим источник света (галогенная лампа или лампа накаливания) и стекло или оргстекло (желательно матовое для лучшего рассеивания света), на которое будет помещен лист с филигранью. Для того чтобы избежать деформации листа, а, следовательно, искажения снимка филигрании, лучше зажимать снимаемый источник между двумя листами оргстекла. Для этих целей можно использовать строительные пружинные зажимы. Это совершенно безопасно для документов, в том числе с печатями, и минимизирует прикосновения к бумаге, которых не избежать при ручном калькировании.

В качестве источника света для съемки грамот без печатей можно использовать негатоскоп⁶ с лампой накаливания (из-за того, что этот прибор нагревается до высоких температур, есть опасность повредить печати, они имеются на документе). Более современные негатоскопы, а также световые планшеты, не подходят для ИК-съемки в ближнем диапазоне, поскольку в них используются светодиодные и люминесцентные лампы, не дающие ИК-излучения.

Процесс съемки выглядит следующим образом: грамота с филигранью зажимается между листами оргстекла, под которыми помещен источник света, сверху находится камера с ИК-фильтром, подключенная к компьютеру. Таким образом, ИК-излучение от лампы накаливания проходит через лист бумаги, попадает на ИК-фильтр, отсекающий волны короче 0,95 мкм, и изображение фиксируется чувствительной камерой.

Полученный снимок при необходимости можно обработать, а также его следует привязать к размерной сетке. Таким образом, в распоряжении исследователя оказывается цифровое изображение филигрании, свободное от чернил, которое можно сравнивать путем наложения с другими снимками. Более того, съемка в ближнем ИК-диапазоне позволяет получить изображение филигрании вместе с сеткой вержеров и понтюзо, что принципиально важно при идентификации бумаги, произведенной на одной листоотливной форме.

Такая организация съемки используется нами в Лаборатории комплексного исследования рукописных памятников Санкт-Петербургского института истории РАН для исследования филиграний русских судебных документов XV–XVI вв. Для работы используется монохромная высокочувствительная камера QHY 163m. Перед нами стояла задача идентифицировать бумагу, на которой составлялись протоколы монастырских земельных тяжб, и сопоставить ее с бумагой монастырского делопроизводства. Основной исследовательский вопрос состоял в том, чтобы выяснить – использовалась ли во время судебных разбирательств монастырей для составления судебных документов монастырская бумага, или же присылаемые из Москвы судьи привозили ее с собой? Ответ на этот вопрос позволит лучше понять устройство системы судебного делопроизводства и степень участия в нем заинтересованных сторон.

Можно ожидать, что в ближайшие годы появится специально разработанное для нужд источниковедения оборудование, простое в использовании и предназначенное для специалистов в области гуманитарного знания. В 2018 г. группа исследователей из Корнельского, Нью-Йоркского и Йельского университетов, а также университета Нортуэстерн, приступили

⁶ Негатоскоп – это устройство, представляющее собой коробку со светящимся экраном, предназначенное для просмотра на просвет сухих и мокрых черно-белых радиографических снимков (рентгенограмм, томограмм и т. д.) в медицине и технике.

к разработке портативного оборудования для исследования филигранных и сеток листоотливной формы (Watermark Imaging Box – WImBo)⁷. Работа над созданием такого оборудования ведется в рамках проекта по исследованию бумаги гравюр Рембрандта. Из-за того, что на большинстве гравюр не сохранилось филигранных, исследователи разработали методику идентификации бумаги при помощи замера сетки вержеров и понтюзо (The Chain Line Pattern (CLiP) Matching Project). В результате планируется получить компактный, относительно недорогой и простой в использовании прибор, который благодаря широкому использованию позволит за короткое время создать большую базу водяных знаков [Frank et al., 2018; Johnson, 2018].

Итак, мы представили краткий обзор исследовательских методик, в которых применяется ИК-визуализация: от затратных и сложных (термография, гиперспектральный анализ), требующих обработки полученных данных математическими методами, до относительно простых (съемка в ближнем ИК-диапазоне), которые можно применять в повседневной исследовательской практике и как подготовительный этап к более тщательному анализу. Мы полагаем, что исследование рукописей движется в двух направлениях: с одной стороны, большие междисциплинарные исследовательские коллективы разрабатывают специализированное оборудование и программное обеспечение для решения задач в масштабных исследовательских проектах, с другой стороны, появляются простые в обращении и недорогие приборы (например, чувствительные камеры, портативные микроскопы), которые позволяют отдельным ученым производить более детальные измерения в повседневной исследовательской практике. Съемка в ближнем ИК-диапазоне, несомненно, должна стать рутинной процедурой анализа исторических источников.

Список литературы

- Лютов В. П., Лютова Л. В. Использование радиографии в исследовании водяных знаков и при атрибуции памятников письменности // Фотография. Изображение. Документ. 2014. № 5. С. 72–75.
- Ляховицкий Е. А. Классификация в филигранографии: удобство поиска или возможность интерпретации? // Фотография. Изображение. Документ. 2011. № 2. С. 38–48.
- Ляховицкий Е. А., Цыпкин Д. О. Инфракрасная визуализация текста в изучении памятников древнерусской письменности // Ист. информатика. 2019. № 4. С. 148–156.
- Миклас Х., Бреннер С., Саблатниг Р. Мультиспектральная съемка для цифровой реставрации древних рукописей: устройства, методы и практические аспекты // Ист. информатика. 2017. № 3. С. 116–134.
- Уханова Е. В., Бережная М. А. База данных водяных знаков средневековой бумаги Отдела рукописей Государственного исторического музея в рамках международного проекта «Бернштейн – память бумаги»: результаты сотрудничества и перспективы развития // Роль музеев в информационном обеспечении исторической науки. М., 2015. С. 328–339.
- Уханова Е. В., Жижин М. Н., Андреев А. В., Пойда А. А., Ильин В. А. Прижизненный портрет Ивана Грозного: визуализация угасшего памятника естественнонаучными методами // Древняя Русь. Вопросы медиевистики. 2019. № 2 (76). С. 13–29.
- Шибаетов М. А. Рукописи Кирилло-Белозерского монастыря XV в.: историко-кодинологическое исследование. СПб.: Альянс-Архео, 2013. 560 с.
- Эрастов Д. П. Бета-радиографический метод воспроизведения филигранных // Доклады и сообщения на совещании по вопросам консервации и реставрации художественных ценностей. М., 1960. Ч. 2. С. 55–60.

⁷ Подробнее см. сайт проекта. URL: <http://www.emilybeatricefrank.com/rembrandt-watermark-imaging-project> (дата обращения 25.04.2020).

- Эрастов Д. П.** Оптико-фотографическое исследование рукописи // *Неизвестный памятник книжного искусства: Опыт восстановления французского легендария XIII в.* М.; Л., 1963. С. 16–21.
- Эрастов Д. П.** Основные методы фотографического выявления угасших текстов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 54 с.
- Alexopoulou A., Kaminari A.** The Evolution of Imaging Techniques in the Study of Manuscripts. *Manuscript Cultures*, 2014, no. 7, p. 58–68.
- Ceccarelli S., Guarneri M., Ferri de Collibus M., Francucci M., Ciaffi M., Danielis, A.** Laser Scanners for High-Quality 3D and IR Imaging in Cultural Heritage Monitoring and Documentation. *J. Imaging*, 2018, no. 4 (11), p. 1–18.
- Clark W.** *Photography by Infrared: its Principles and Applications.* New York, J. Wiley & Sons, Inc., 1939, 397 p.
- Consolandi L., Bertani D.** A Prototype for High Resolution Infrared Reflectography of Paintings. *Infrared Physics and Technology*, 2007, no. 49, p. 239–242.
- Frank E. B., Ellis M. H., Aikenhead L., Messier P.** The Computational Analysis of Watermarks: Setting the Stage for the Development of a Watermark Imaging Box (WImBo). In: 52nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8362312> (accessed 25.04.2020).
- Gargano M., Bertani D., Greco M., Cupitt J., Gadia D.** A Perceptual Approach to the Fusion of Visible and NIR Images in the Examination of Ancient Documents. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, no. 16, p. 518–525.
- Gavrilov D., Maev R. Gr., Almond D. P.** A Review of Imaging Methods in Analysis of Works of Art: Thermographic Imaging Method in Art Analysis. *Canadian Journal of Physics*, 2014, no. 92 (4), p. 341–364.
- Giacometti A., Campagnolo A., MacDonald L., Mahony S., Robson S., Weyrich T., Terras M., Gibson A.** The Value of Critical Destruction: Evaluating Multispectral Image Processing Methods for the Analysis of Primary Historical Texts. *Digital Scholarship in the Humanities*, 2015, vol. 32, no. 1, p. 101–122.
- Johnson C. R.** WImBo – Watermark Imaging Nox Project: A Digital Art History Data Acquisition Tool. In: 52nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8362290> (accessed 25.04.2020).
- Kim S. J., Deng F., Brown M. S.** Visual Enhancement of Old Documents with Hyperspectral Imaging. *Pattern Recognition*, 2011, vol. 44, no. 7, p. 1461–1469.
- Knox K. T.** Enhancement of Overwritten Text in the Archimedes Palimpsest. In: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Conference Series 6810, 2008. URL: http://web.eecs.umich.edu/~hero/Preprints/3-Knox_EI_2008_6810_8.pdf (accessed 25.04.2020).
- Orazi N.** Mid-wave Infrared Reflectography and Thermography for the Study of Ancient Books: a Review. *Studies in Conservation*, 2020. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00393630.2020.1734383> (accessed 25.04.2020).
- Padoan R., Steemers Th. A. G., Klein M. E., Aalderink B. J., de Bruin G.** Quantitative Hyperspectral Imaging of Historical Documents: Technique and Applications. In: 9th International Conference on NDT of Art (Jerusalem, Israel, 25–30 May, 2008). URL: <https://www.ndt.net/article/art2008/papers/097Padoan.pdf> (accessed 25.04.2020).
- Psarrou A., Licata A., Kokla V., Tselikas A.** Near-Infrared Ink Differentiation in Medieval Manuscripts. *International Journal of Computer Vision*, 2011, no. 94, p. 136–151.
- Tournié A., Fleischer K., Bukreeva I., Palermo F., Perino M., Cedola A., Andraud C., Rannocchia G.** Ancient Greek Text Concealed on the Back of Unrolled Papyrus Revealed through Shortwave-infrared Hyperspectral Imaging. *Science Advances*, 2019, no. 5 (10). URL: <https://advances.sciencemag.org/content/5/10/eaav8936.full> (accessed 25.04.2020).

Tsyarkin D. O. Optico-Electronic Methods in the Study of Medieval Paper in the Manuscript Division of the National Library of Russia. In: *Le papier au Moyen Age: histoire et techniques*. (Bibliologia: elementa ad librorum studia pertinenta. Vol. 19). Turnhout, 1999, p. 243–253.

References

- Alexopoulou A., Kaminari A.** The Evolution of Imaging Techniques in the Study of Manuscripts. *Manuscript Cultures*, 2014, no. 7, p. 58–68.
- Ceccarelli S., Guarneri M., Ferri de Collibus M., Francucci M., Ciaffi M., Danielis A.** Laser Scanners for High-Quality 3D and IR Imaging in Cultural Heritage Monitoring and Documentation. *J. Imaging*, 2018, no. 4 (11), p. 1–18.
- Clark W.** Photography by Infrared: its Principles and Applications. New York, J. Wiley & Sons Inc., 1939, 397 p.
- Consolandi L., Bertani D.** A Prototype for High Resolution Infrared Reflectography of Paintings. *Infrared Physics and Technology*, 2007, no. 49, p. 239–242.
- Erastov D. P.** Beta-radiograficheskii metod vosproizvedeniya filigranei [The Beta-radiography Method of Watermarks Imaging]. In: *Doklady i soobshcheniya na soveshchaniy po voprosam konservatsii i restavratsii khudozhestvennykh tsennostei* [Papers and Reports at a Meeting on Conservation and Restoration of Art Values]. Moscow, 1960, iss. 2, p. 55–60. (in Russ.)
- Erastov D. P.** Optiko-fotograficheskoe issledovanie rukopisi [Optical and Photographic Study of the Manuscript]. In: *Neizvestnyi pamyatnik knizhnogo iskusstva: Opyt vosstanovleniya frantsuzskogo legendariya XIII v.* [Unknown Manuscript: the Experience of the 13th Century French Book of Legends Restoration]. Moscow, Leningrad, 1963, p. 16–21. (in Russ.)
- Erastov D. P.** Osnovnye metody fotograficheskogo vyyavleniya ugasshikh tekstov [The Basic Methods of Faded Texts' Photographic Identification]. Moscow, Leningrad, Izdatel'stvo Akademii nauk SSSR, 1958, 54 p. (in Russ.)
- Frank E. B., Ellis M. H., Aikenhead L., Messier P.** The Computational Analysis of Watermarks: Setting the Stage for the Development of a Watermark Imaging Box (WImBo). In: 52nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8362312> (accessed 25.04.2020).
- Gargano M., Bertani D., Greco M., Cupitt J., Gadia D.** A Perceptual Approach to the Fusion of Visible and NIR Images in the Examination of Ancient Documents. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, no. 16, p. 518–525.
- Gavrilov D., Maev R. Gr., Almond D. P.** A Review of Imaging Methods in Analysis of Works of Art: Thermographic Imaging Method in Art Analysis. *Canadian Journal of Physics*, 2014, no. 92 (4), p. 341–364.
- Giacometti A., Campagnolo A., MacDonald L., Mahony S., Robson S., Weyrich T., Terras M., Gibson A.** The Value of Critical Destruction: Evaluating Multispectral Image Processing Methods for the Analysis of Primary Historical Texts. *Digital Scholarship in the Humanities*, 2015, no. 32, iss. 1, p. 101–122.
- Johnson C. R.** WImBo – Watermark Imaging Box Project: A Digital Art History Data Acquisition Tool. In: 52nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS). 2018. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8362290> (accessed 25.04.2020).
- Kim S. J., Deng F., Brown M. S.** Visual Enhancement of Old Documents with Hyperspectral Imaging. *Pattern Recognition*, 2011, no. 44, iss. 7, p. 1461–1469.
- Knox K. T.** Enhancement of Overwritten Text in the Archimedes Palimpsest. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers Conference Series 6810. 2008. URL: http://web.eecs.umich.edu/~hero/Preprints/3-Knox_EI_2008_6810_8.pdf (accessed 25.04.2020).
- Lyakhovitsky E. A.** Klassifikatsiya v filigranografii: udobstvo poiska ili vozmozhnost' interpretatsii? [The Classification in Filigranography: Search Convenience or Interpretation Possibilities?].

- Fotografiya. Izobrazhenie. Dokument* [Photography. Image. Document], 2011, no. 2, p. 38–48. (in Russ.)
- Lyakhovitsky E. A., Tsypkin D. O.** Infekrasnaya vizualizatsiya teksta v izuchenii pamyatnikov drevnerusskoi pis'mennosti [Infrared Visualization of Text in Studying Old Russian Manuscripts]. *Istoricheskaya informatika* [Historical informatics], 2019, no. 4, p. 148–156. (in Russ.)
- Lyutov V. P., Lyutova L. V.** Ispol'zovanie radiografii v issledovanii vodyanykh znakov i pri atributsii pamyatnikov pis'mennosti [Application of Radiography for Investigation of Watermarks' and Attribution of Manuscripts]. *Fotografiya. Izobrazhenie. Dokument* [Photography. Image. Document], 2014, no. 5, p. 72–75. (in Russ.)
- Miklas H., Brenner S., Sablatnig R.** Mul'tispektral'naya s'emka dlya tsifrovoy restavratsii drevnikh rukopisei: ustroystva, metody i prakticheskie aspekty [Multispectral Imaging for Ancient Manuscripts' Digital Restoration: Devices, Methods and Practical Aspects]. *Istoricheskaya informatika* [Historical informatics], 2017, no. 3, p. 116–134. (in Russ.)
- Orazi N.** Mid-wave Infrared Reflectography and Thermography for the Study of Ancient Books: A Review. *Studies in Conservation*, 2020. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00393630.2020.1734383> (accessed 25.04.2020).
- Padoan R., Steemers Th. A. G., Klein M. E., Aalderink B. J., de Bruin G.** Quantitative Hyperspectral Imaging of Historical Documents: Technique and Applications. In: 9th International Conference on NDT of Art (Jerusalem, Israel, 25–30 May, 2008). URL: <https://www.ndt.net/article/art2008/papers/097Padoan.pdf> (accessed 25.04.2020).
- Psarrou A., Licata A., Kokla V., Tselikas A.** Near-Infrared Ink Differentiation in Medieval Manuscripts. *International Journal of Computer Vision*, 2011, no. 94, p. 136–151.
- Shibaev M. A.** Rukopisi Kirillo-Belozerskogo monastyrja XV v.: istoriko-kodikologicheskoe issledovanie [The Manuscripts of Kirillo-Belozersky Monastery of 15th Century: Historical and Codicological Study]. St. Petersburg, Al'yans-Arkheo, 2013, 560 p. (in Russ.)
- Tournié A., Fleischer K., Bukreeva I., Palermo F., Perino M., Cedola A., Andraud C., Rano-cchia G.** Ancient Greek Text Concealed on the Back of Unrolled Papyrus Revealed through Shortwave-infrared Hyperspectral Imaging. *Science Advances*, 2019, no. 5 (10). URL: <https://advances.sciencemag.org/content/5/10/eaav8936.full> (accessed 25.04.2020).
- Tsypkin D. O.** Optico-Electronic Methods in the Study of Medieval Paper in the Manuscript Division of the National Library of Russia. In: *Le papier au Moyen Age: histoire et techniques*. (Bibliologia: elementa ad librorum studia pertinenta, vol. 19). Turnhout, 1999, p. 243–253.
- Ukhanova E. V., Berezhnaya M. A.** Baza dannykh vodyanykh znakov srednevekovoi bumagi Otdela rukopisei Gosudarstvennogo istoricheskogo muzeya v ramkakh mezhdunarodnogo proekta "Bernshtein – pamyat' bumagi": rezul'taty sotrudnichestva i perspektivy razvitiya [Medieval Watermarks Database in the Manuscript Department of the State Historical Museum in the Context of the International Project "Bernstein – Memory of Paper": the Results of Cooperation and the Development Prospect]. In: *Rol' muzeev v informatsionnom obespechenii istoricheskoi nauki* [Role of Museums in Information Support of Historical Science]. Moscow, 2015, p. 328–339. (in Russ.)
- Ukhanova E. V., Zhizhin M. N., Andreev A. V., Poida A. A., Ilyin V. A.** Prizhiznennyy portret Ivana Groznogo: vizualizatsiya ugasshego pamyatnika estestvennonauchnymi metodami [A Lifetime Portrait of Tsar Ivan the Terrible: the Visualization of a Faded Monument by Natural Science Methods]. *Drevnyaya Rus'. Voprosy medievistiki* [Old Russia. The Questions of Middle Ages], 2019, no. 2 (76), p. 13–29. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию
Received
29.04.2020

Сведения об авторе

Калашникова Ангелина Анатольевна – аспирант, младший научный сотрудник Научно-исторического архива Санкт-Петербургского института истории РАН (Санкт-Петербург, Россия)
aastafieva@eu.spb.ru

Information about the Author

Angelina A. Kalashnikova – Postgraduate Student, Junior Researcher, Scientific and Historical Archive, Saint Petersburg Institute of History of the RAS (St. Petersburg, Russian Federation)
aastafieva@eu.spb.ru