

**ABSTRAKT:** Obrazowanie spektralne jest techniką obrazowania w szerokim spektrum zakresu elektromagnetycznego coraz chętniej stosowaną w digitalizacji i w badaniach technologicznych nad obiektami zabytkowymi.

W niniejszym opracowaniu o obrazowaniu spektralnym mówi się w kontekście zjawiska odbicia światła w zakresie widzialnym do krótkiej podczerwieni.

Znormalizowane dane uzyskane w wyniku obrazowania wielospektralnego niosą informacje o chemicznym składzie badanego obiektu, dalsza ich prezentacja może zatem uwzględnić nie tylko wizualizację dzieła ogólnie, ale również przedstawiać różnice w jego składzie materiałowym.

W niniejszym opracowaniu omówiono techniczne różnice między obrazowaniem wielokanałowym a wielospektralnym – zaprezentowano schemat układu aparaturowego służącego do zbierania obrazów tego typu oraz wprowadzono pojęcie kalibracji radiometrycznej. W dalszej części opisano krótko przykłady zastosowań fotografii analitycznej oraz przedstawiono możliwe strategie przetwarzania i analizy danych hiperspektralnych w odniesieniu do badania dzieł sztuki.

**SŁOWA KLUCZOWE:** fotografia analityczna, obrazowanie hiperspektralne, reflektografia w podczerwieni, spektroskopia odbiciowa, obiekty zabytkowe

**ABSTRACT:** Spectral imaging is an imaging technique in the broad range of the electromagnetic spectrum that is increasingly being used in digitisation and technological investigations of heritage objects.

In this paper, spectral imaging is discussed in the context of the phenomenon of reflectance in the visible to short infrared spectral range. A procedure for calibrating images against a standard with known reflectivity characteristics provides information about reflectance, which is a material-specific quantity.

Since the normalised data carry information about the chemical composition of the investigated object, further presentation of the data can include not only the visualisation of the object in general, but also present differences in its material composition.

This paper discusses the technical differences between multiband and (multi)-hyperspectral imaging, presents a schematic of the apparatus system used to collect images of these types, and introduces the concept of radiometric calibration. The following section briefly describes examples of analytical photography applications and presents possible strategies for processing and analysing hyperspectral data with regard to the investigation of works of art.

**KEYWORDS:** analytical photography, hyperspectral imaging, infrared reflectography, reflectance spectroscopy, heritage objects

# OBRAZOWANIE WIELOSPEKTRALNE W DIGITALIZACJI MUZEALIÓW: ASPEKTY TECHNICZNE, WSTĘPNE PRZETWARZANIE ORAZ METODY ANALIZY I WIZUALIZACJI DANYCH

DOI: 10.5604/01.3001.0055.1371

*Paulina Krupska-Wolas<sup>(1,2)</sup>, Michał Obarzanowski<sup>(1)</sup>, Tomasz Wilkosz<sup>(1)</sup>, Julio M. del Hoyo-Meléndez<sup>(1)</sup>*

<sup>1</sup> *Laboratorium Analiz i Nieniszczących  
Badań Obiektów Zabytkowych, Muzeum  
Narodowe w Krakowie*

<sup>2</sup> *Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej,  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie*

*Studia Wilanowskie*

t. XXXI, 2024, s. 199–244

Rocznik, E-ISSN: 2720-0116

## WSTĘP

W zakresie badań nad dziedzictwem kulturowym nieinwazyjne badania technologiczne odgrywają nieocenioną rolę ze względu na szereg możliwości poznawczych, jakich mogą dostarczać na temat drogiego obiektu przy jednoczesnym poszanowaniu jego integralności. Techniki obrazowania pozostają szczególnie doceniane ze względu na fakt, że pozwalają spojrzeć na obiekt w skali globalnej, tj. oceniać pewne cechy w odniesieniu do pełnej kompozycji dzieła i sztuki artysty.

Fotografia w szerokim zakresie spektrum elektromagnetycznego (EM) stanowi bardzo popularne i szeroko eksploatowane narzędzie wykorzystywane w celu zarówno digitalizacji muzealiów, jak i szeroko rozumianego naukowego opracowania zbiorów, które ma na celu m.in. dokonanie oceny stanu zachowania, składu materiałowego, zaprojektowanie i zastosowanie strategii ochrony dzieła czy ewentualnych zabiegów konserwatorskich.

Oprócz klasycznej fotografii analitycznej coraz bardziej popularne stają się systemy obrazowania spektroskopowego. Można wyróżnić: instrumenty do obrazowania z wykorzystaniem analizy pierwiastkowej (np. XRF<sup>1</sup>, skaningową mikroskopię optyczną<sup>2</sup>) oraz molekularną (wykorzystujące zjawisko odbicia w świetle widzialnym i podczerwonym<sup>3</sup>, dyfrakcję rentgenowską<sup>4</sup>, efekt Ramana<sup>5</sup> i in.). W celu wykonania wyczerpującego opisu obiektu standardem jest stosowanie wielu komplementarnych technik<sup>6</sup>.

Aby poznać możliwości, jakie oferują techniki obrazowania dzieł sztuki, należy przede wszystkim zrozumieć zjawiska odpowiadające za powstawanie obrazów, które otrzymuje się w kamerach wykorzystywanych przez badających zabytkowe obiekty użytkowników.

- 1 M. Alfeld *et al.*, *A mobile instrument for in situ scanning macro-XRF investigation of historical paintings*, „Journal of Analytical Atomic Spectrometry”, vol. 28(5), 2013, s. 760–767.
- 2 C. J. G. Hoek van *et al.*, *A SEM-EDS Study of Cultural Heritage Objects with Interpretation of Constituents and Their Distribution Using PARC Data Analysis*, „Microscopy and Microanalysis”, vol. 17(5), 2011, s. 656–660.
- 3 J. K. Delaney *et al.*, *Visible and infrared imaging spectroscopy of paintings and improved reflectography*, „Heritage Science”, vol. 4(6), 2016.
- 4 V. Gonzales *et al.*, *X-ray Diffraction Mapping for Cultural Heritage Science: a Review of Experimental Configurations and Applications*, „Chemistry. A European Journal”, vol. 26(8), 2019.
- 5 A. Rousaki, P. Vandenabeele, *In situ Raman spectroscopy for cultural heritage studies*, „Journal of Raman Spectroscopy”, vol. 52, 2021.
- 6 E. Catelli *et al.*, *Towards the non-destructive analysis of multilayered samples: A novel XRF-VNIR-SWIR hyperspectral imaging system combined with multiblock data processing*, „Analytica Chimica Acta”, vol. 1239, 2023; J. K. Delaney *et al.*, *Integrated X-ray fluorescence and diffuse visible-to-near-infrared reflectance scanner for standoff elemental and molecular spectroscopic imaging of paints and works on paper*, „Heritage Science”, vol. 6(31), 2018; L. M. Smieska *et al.*, *Synchrotron-Based High-Energy X-ray MA-XRF and MA-XRD for Art and Archaeology*, „Synchrotron Radiation News”, vol. 32(6), 2019.

W niniejszym opracowaniu skupiono się na omówieniu technik obrazowania wielokanałowego (wybrane techniki klasycznej fotografii analitycznej) i wielospektralnego (obrazowanie spektroskopią odbiciową w zakresie widzialnym (Vis) oraz bliskiej (z ang. NIR – *Near InfraRed*) i krótkiej podczerwieni (z ang. SWIR – *Short Wavelength InfraRed*) w kontekście digitalizacji muzealiów.

## ODDZIAŁYWANIE ŚWIATŁA Z MATERIAŁ

Obrazy, które rejestruje aparat stanowią rezultat oddziaływania promieniowania źródła światła z materiałem obiektu. Każdy foton będący częścią strumienia świetlnego generowanego przez źródło oświetlenia może zostać zaabsorbowany, odbity lub rozproszony napotkawszy przeszkodę (w tym przede wszystkim badany obiekt). Energia fotonu emitowanego przez standardową lampę jest rzędu elektronowoltów (eV) i może powodować wzbudzenia elektronowe i oscylacyjne w strukturze molekularnej materiału obiektu.

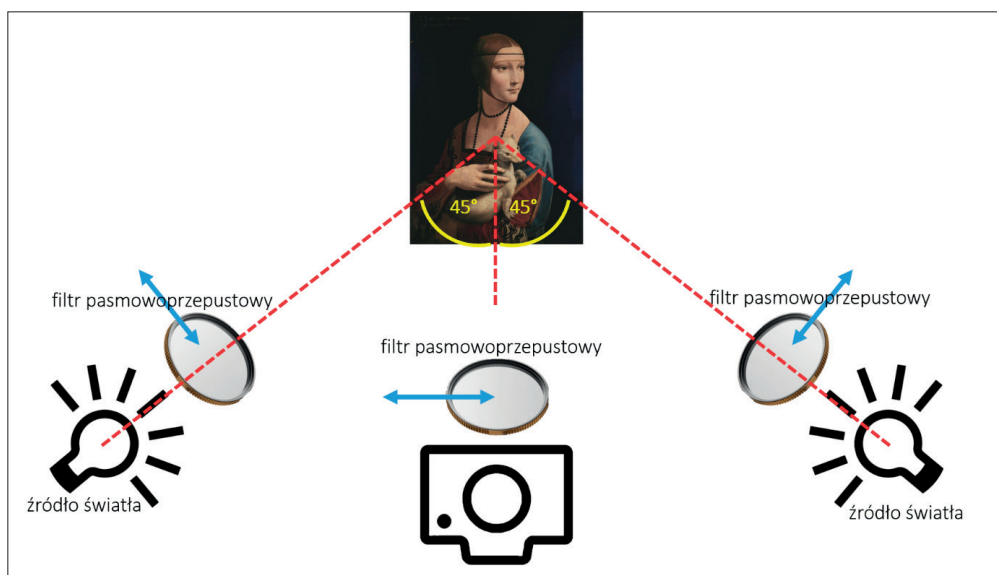
Materię tworzą molekuly zbudowane z atomów połączonych w wyniku wiązań chemicznych. Każda molekula posiada kilka rodzajów energii: energię postępową (nie dotyczy ciał stałych), energię rotacyjną (wirowanie atomów i cząsteczek wokół własnej osi), oscylacyjną (zmiana długości i kątów wiązań między atomami cząsteczki), elektronową (poziomy energetyczny elektronów) oraz energię spinową jąder atomów. Absorpcja fotonu o energii rzędu eV może spowodować wzbudzenie cząsteczki poprzez zmianę jej energii oscylacyjnej i elektronowej. Wzbudzona cząstka dąży do osiągnięcia stanu podstawowego poprzez deekscytację. Sposoby relaksacji schematycznie przedstawia diagram Jabłońskiego<sup>7</sup>.

Każda molekula jest w stanie zaabsorbować jedynie te fotony o energii odpowiadającej różnicy energetycznej w jej poziomach oscylacyjnych lub elektronowych. Poprzez deekscytację rozumie się szereg procesów, w tym m.in. oscylacyjną relaksację, jak i fluorescencję czy fosforescencję. W wyniku zajścia tych procesów możliwa jest rejestracja w detektorach wykorzystywanych aparatów fotonów rozproszonych wstecznie. Fotony te posiadają charakterystyczne dla danego procesu deekscytacji w konkretnej molekule energie, które bezpośrednio przekładają się na długość fali (zgodnie z zależnością  $E = \frac{hc}{\lambda}$ , gdzie  $E$  to energia,  $h$  to stała Plancka,  $c$  – prędkość światła,  $\lambda$  – długość fali).

Wobec powyższego, obraz uzyskiwany w wyniku pomiaru (w trybie odbiciowym) stanowi sumę wszystkich procesów relaksacyjnych fotografowanego obiektu i jego otoczenia, które wzbudzono promieniowaniem źródła. Jana Striova w swojej pracy<sup>8</sup> dokonała podsumowania zjawisk, które mogą być obserwowane pod postacią konkretnych pasm w uzyskanych widmach

7 A. Jablonski, *Efficiency of Anti-Stokes Fluorescence in Dyes*, „Nature”, vol. 131, 1933, s. 839–840; J. R. Lakowicz, *Principles of Fluorescence Spectroscopy. Third edition*, 2006.

8 J. Striova et al., *Reflectance imaging spectroscopy in heritage science*, „La Rivista del Nuovo Cimento”, vol. 43, 2020, s. 515–566.



il. 1

Schemat stanowiska pomiarowego do obrazowania wielokanałowego/wielospektralnego w trybie odbitym

odbiciowych w odniesieniu do struktury molekularnej badanego materiału ze szczególnym uwzględnieniem pigmentów. Należy również pamiętać, że wiele czynników fizycznych, takich jak np. stopień chropowatości powierzchni obiektu, rozmiar i gęstość upakowania ziaren pigmentów w spoiwie, ma także wpływ na ostateczny obraz wynikowy.

## SYSTEMY OBRAZOWANIA W SZEROKIM ZAKRESIE

### WIDMA EM

Obrazy otrzymuje się poprzez rejestrację promieniowania o wybranym charakterze (tj. odbitego, przechodzącego czy indukowanego) w zadanym zakresie spektralnym o dowolnej szerokości (dzięki zastosowaniu odpowiednich filtrów spektralnych lub optyki dyspersyjnej). W zależności od zastosowanego rodzaju źródła światła lub filtra pozwalającego naświetlać obiekt promieniowaniem z wybranego zakresu spektrum (UV, Vis) można spodziewać się konkretnej odpowiedzi materiału badanego obiektu i zaaranżować stosowne stanowisko pomiarowe. Na ilustracji 1 przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego do pozyskiwania obrazów wielokanałowych/wielospektralnych. Jak zaprezentowano: kąt padania światła powinien wynosić  $45^\circ$ , tak aby uniknąć odbić zwierciadlanych od obiektu<sup>9</sup>. W zależności od zastosowanego oświetlenia oraz oczekiwanego obrazu wynikowego, można dowolnie modyfikować ułożenie oraz typ stosowanych filtrów pasmowo-przepustowych (co symbolicznie oznaczono za pomocą niebieskich strzałek). Filtry na drodze obiekt–aparat mogą również zostać zastąpione przez odpowiedni układ optyczny wyposażony w elementy dyspersyjne i przystosowaną do tego rodzaju akwizycji elektronikę odczytu.

<sup>9</sup> International Commission on Illumination, *Technical Report. Colorimetry*, 2004.

Rodzaje oświetlenia i stosowanych filtrów na linii: źródła światła–obiekt oraz obiekt–aparat mogą każdorazowo być dobierane tak, aby uzyskać obraz o odpowiednich cechach, np. w świetle widzialnym, IR, UV czy w świetle widzialnym indukowanym przez UV. W kwestiach aranżacji stanowiska pomiarowego oraz wstępnego przetwarzania obrazów warto polecić przewodnik po obrazowaniu multispektralnym wydany przez British Museum<sup>10</sup>.

Należy również wspomnieć, że obrazy wielokanałowe/wielospektralne można pozyskiwać głównie w wyniku skanowania obiektu: punkt po punkcie (z ang. *whiskbroom imaging*), linia po linii wzdłuż wybranego kierunku płaszczyzny (z ang. *pushbroom imaging*) oraz w wyniku akwizycji obszarowej<sup>11</sup>, gdzie rejestruje się cały obszar kadru dla danego przedziału długości fal, stosując odpowiednie filtry dostrajające<sup>12</sup>. W przypadku skanowania punktowego lub liniowego informacja o intensywności w zależności od długości fali uzyskiwana jest poprzez wykorzystanie układów optycznych wyposażonych w elementy dyspersyjne oraz pryzmaty<sup>13</sup>. Natomiast systemy obrazowania obszarowego najczęściej wykorzystują w tym celu filtry kołowe, LCTF (z ang. *Liquid Crystal Tunable Filter*) czy AOTF (z ang. *Acousto-Optic Tunable Filter*)<sup>14</sup>.

## WSTĘPNE PRZETWARZANIE OBRAZÓW

Wszystkie obrazy powinny zostać poddane korekcji ze względu na szum własny detektora aparatu oraz niejednorodne oświetlenie obrazowanego obiektu, które może wynikać zarówno z niedoskonałości geometrii układu pomiarowego, jak i przestrzennej struktury samego obiektu.

Korekcji prądu ciemnego, który stanowi sygnał (szum) generowany przez elektronikę detektora przy zamkniętej przesłonie (tj. w sytuacji braku

10 J. Dyer, G. Verri, J. Cupitt, *Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence modes. A User Manual*, 2013; [https://www.researchgate.net/publication/267266175\\_Multispectral\\_Imaging\\_in\\_Reflectance\\_and\\_Photo-induced\\_Luminescence\\_modes\\_A\\_User\\_Manual](https://www.researchgate.net/publication/267266175_Multispectral_Imaging_in_Reflectance_and_Photo-induced_Luminescence_modes_A_User_Manual) (dostęp: 20 V 2024).

11 R. Pillay, J. Y. Hardeberg, S. George, *Hyperspectral Calibration of Art: Acquisition and Calibration Workflows*, „Journal of the American Institute of Conservation”, vol. 58(1), 2019; M. Picollo *et al.*, *Hyper-Spectral Imaging Technique in the Cultural Heritage Field. New Possible Scenarios*, „Sensors”, vol. 20(10), 2020; Q. Li *et al.*, *Review of spectral imaging technology in biomedical engineering. Achievements and challenges*, „Journal of Biomedical Optics”, vol. 18, (2013).

12 Q. Li *et al.*, *op. cit.*; N. Hagen *et al.*, *Snapshot advantage: A review of the light collection improvement for parallel high-dimensional measurement systems*, „Optical Engineering”, vol. 51, 2012, s. 1–7; O. Pust, *Innovative Filter Solutions for Hyperspectral Imaging*, „Optik & Photonik”, vol. 11(3), 2016.

13 R. Pillay, J. Y. Hardeberg, S. George, *op. cit.*; M. Picollo *et al.*, *op. cit.*

14 Q. Li *et al.*, *op. cit.*; N. Hagen *et al.*, *op. cit.*; O. Pust, *op. cit.*, 2016; H. Lee, M. H. Kim, *Building a Two-Way Hyperspectral Imaging System with Liquid Crystal Tunable Filters*, w: *Image and Signal Processing, 6<sup>th</sup> International Conference, ICISP 2014*, vol. 8509, 2014, (Lecture Notes in Computer Science); R. Abdlaty, Q. Fang, *Acousto-optic tunable filter-based hyperspectral imaging system characterization*, *SPIE BiOS 2019*, „Design and Quality for Biomedical Technologies XII”, 2019.

## il. 2a–d

Wybrany kadr obrazu *Portret Dantego* ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie: (a) fragment surowego obrazu niepoddanego przetwarzaniu wstępnemu; (b) obraz prądu ciemnego; (c) obraz białego pola; (d) wynikowy obraz przetworzony; w przypadku obrazów z zakresu widzialnego należy dodatkowo dokonać korekcji względem standardu barwnego (np. wzorec ColorChecker)<sup>17</sup> celem odpowiedniego odwzorowania kolorów



rejestracji promieniowania), dokonuje się poprzez odjęcie od fotografii obiektu obrazu czerni. Operacja ta pozwala przy okazji pozbyć się off-setu, czyli niezerowych wartości bazowych detektora.

Kolejnym krokiem jest korekcja płaskiego pola (z ang. *flat-field correction*), która koryguje różnice w przestrzennej reakcji detektora i uwzględnia niejednorodność oświetlenia obiektu. W wyniku przekształcenia każdy piksel wykazuje się spójną reakcją na dany poziom pobudzenia. Korekcja ta polega na podzieleniu obrazu po kompensacji prądu ciemnego przez obraz białego pola (od którego również należy odjąć prąd ciemny). Jeżeli fotografowane białe pole nie stanowi wzorca bieli przed operacją, należy znormalizować wartości jasności obu obrazów do tej samej wartości.

Wszystkie obrazy – obiektu, prądu ciemnego, bieli – powinny być pozyskiwane przy takich samych parametrach. Poniżej zaprezentowano przykład kompensacji prądu ciemnego i korekcji płaskiego pola<sup>15</sup>.

15 J. Dyer, G. Verri, J. Cupitt, *op. cit.*; R. Pillay, J. Y. Hardeberg, S. George, *op. cit.*; C. Jones et al., *Understanding Multispectral Imaging of Cultural Heritage. Determining Best Practice in MSI Analysis of Historical Artefacts*, „Journal of Cultural Heritage”, vol. 45(1), 2020.

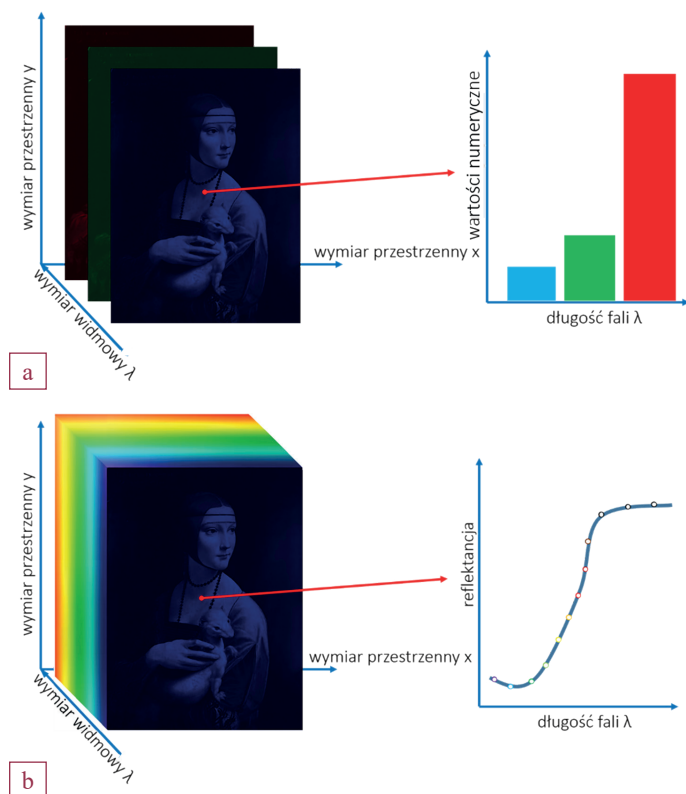
16 H. Lee, *Introduction to Color Imaging Science*, New York 2005.

## OBRAZOWANIE WIELOKANALOWE A WIELOSPEKTRALNE

Obrazowanie wielokanałowe (z ang. MBI – *multiband imaging*) oraz wielospektralne (z ang. MSI/HSI – *multi-/hyperspectral imaging*) w ogólnym rozumieniu oznacza obrazowanie w szerokim zakresie spektrum EM. Obrazowanie wielokanałowe nie podlega jednak kalibracji spektralnej, a w efekcie – otrzymane dane nie są nośnikiem widm spektralnych, w przeciwieństwie do obrazowania wielospektralnego. Zagadnienie kalibracji obrazów multi- i hiperspektralnych opisane zostało w części **Kalibracja radiometryczna i otrzymanie widma spektralnego**.

W przypadku obrazowania wielokanałowego, szerokości zakresów spektralnych pozostają relatywnie szerokie ( $\geq 100$  nm). Dla przykładu – fotografia w świetle widzialnym stanowi przykład obrazowania wielokanałowego (il. 3a), gdzie obraz wynikowy jest złożeniem trzech obrazów zarejestrowanych odpowiednio dla przedziałów długości fal czerwonych (600–800 nm), zielonych (500–600 nm) i niebieskich (400–500 nm). Podobnie można rozpatrywać fotografie pozyskane w zakresie IR, UV czy Vis indukowane UV.

Aby otrzymać obrazy multi- i hiperspektralne muszą one zostać poddane normalizacji radiometrycznej, w wyniku której jasność piksela będzie odzwierciedlać poziom refleksyjności (il. 3b). Z uzyskanego zestawu fotografii



il. 3a–b

Koncepcyjne przedstawienie obrazów (a) wielokanałowych i (b) wielospektralnych

dla każdego punktu na obrazie można więc wyrysować widmo odbiciowe. O obrazowaniu multispektralnym mówi się, gdy rozważanych jest kilka/kilkadziesiąt obrazów w szerokich zakresach spektrum elektromagnetycznego. Obrazy hiperspektralne tworzy zestaw zazwyczaj ponad 100 zdjęć, a każde ujęcie wykonuje się w wąskim zakresie spektralnym (często mniej niż 1 nm), tak że otrzymane widma zdają się być ciągłe (il. 3b).

### FOTOGRAFIA ANALITYCZNA

Fotografia analityczna jest narzędziem pozwalającym zarówno utrwalić wierne odwzorowanie obiektu, jak i ujawniać te informacje, które pozostają niewidoczne gołym okiem. Wizualizacja struktur i subtelnych różnic w składzie materiału pomaga w zrozumieniu historii obiektu, technologii jego wytworzenia oraz zmian, jakie dotknęły go w czasie.

Zaprezentowany poniżej obraz w świetle Vis prezentuje ogólny stan zachowania dzieła. IR ujawnia fragmenty zakrytych kompozycji – portretu i jeźdźca na koniu (oznaczono na żółto na il. 4b). UV ukazuje natomiast miejsca wtórnych nawarstwień i przeprowadzonych prac konserwatorskich.

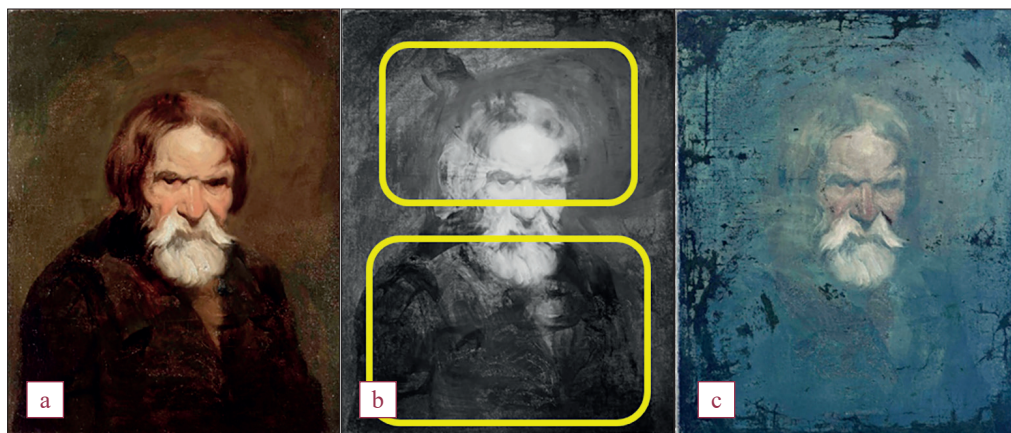
Fotografia w świetle widzialnym stanowi przede wszystkim dokumentację aktualnego stanu zachowania. Dzięki zmianie konfiguracji geometrii pomiarowej można również uzyskać obrazy w świetle bocznym i przechodzącym (przykłady na il. 5). Fotografie te niosą w sobie informacje o ewentualnych nierównościach powierzchni obiektu, sposobie nakładania farby i grubości jej kolejnych warstw.

Reflektografia w podczerwieni, ze względu na obniżoną zdolność fal dłuższych (jakimi są fale podczerwone) do interakcji z materią, dostarcza informacji o rysunkach, podmalowaniach i zmianach kompozycyjnych badanych dzieł (il. 4b i il. 6).

Wiele związków organicznych wykazuje się znaczną absorpcją światła w zakresie UV, co z kolei skutkuje emisją promieniowania w przedziale fal widzialnych. Dzięki temu zjawisku na fotografiach indukowanych

il. 4a–c

Fotografia w różnych zakresach promieniowania EM dla obrazu pt. *Studium brodatego chłopca* autorstwa Piotra Michałowskiego ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie. Światło odbite (a) Vis, (b) IR, (c) Vis indukowane przez UV





UV można obserwować i identyfikować wiele substancji pochodzenia organicznego i nie tylko – jak żywice naturalne i sztuczne<sup>17</sup> (il. 4c i il. 7). Na przykład charakterystyczna pomarańczowa fluorescencja (oznaczono żółtymi strzałkami na il. 7) w partiach zieleni wskazuje na wykorzystanie przez artystę żółcieni kadmowej.

Odpowiedź na napromienienie światłem UV dla niektórych materiałów ulega zmianie w czasie, co może stać się podstawą do oceny datowania<sup>18</sup>. Zjawisko to stanowi również podstawę do uwidaczniania wtórnych

#### il. 5a–b

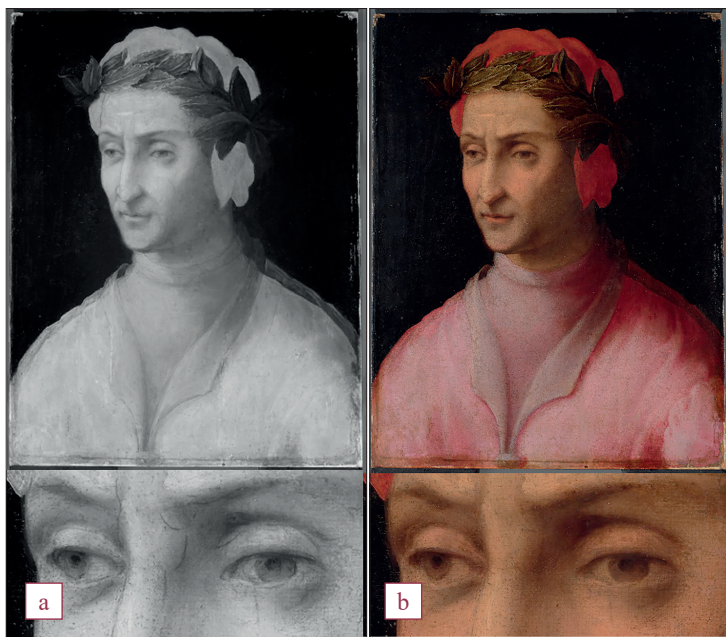
Obraz *Grupa Świętych*  
Bernarda Daddiego  
ze zbiorów Muzeum  
Narodowego w Krakowie:  
(a) fotografia w świetle  
widzialnym odbitym  
oraz odbitym bocznym;  
(b) odwrocie przykładowego  
obrazu zarejestrowane  
w trybie akwizycji światła  
przechodzącego

17 E. Rene de la Rie, *Fluorescence of Paint and Varnish Layers (Part I)*, „Studies in Conservation”, vol. 27, 1982, s. 1–7.

18 M. Thoury et al., *Nondestructive Varnish Identification by Ultraviolet Fluorescence Spectroscopy*, „Applied Spectroscopy”, vol. 61(12), 2007.

il. 6a–b

Obraz pt. *Portret Dantego* nieznanego autora ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie: u góry – całość, poniżej – wybrany fragment; (a) reflektrogram IR, (b) fotografia w świetle widzialnym; fotografia IR ujawnia rysunek oraz zakres autorskiej zmiany obrysu postaci



il. 7a–b

Obraz pt. *Droga w lesie* Józefa Chełmońskiego ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie – obraz w świetle widzialnym oraz w świetle widzialnym indukowanym UV

nawarstwień, tj. werniks datujący fluoryzuje inaczej niż świeżo położony werniks w miejscach przeprowadzonych prac konserwatorskich.

## OBRAZOWANIE HIPERSPEKTRALNE

### Kalibracja radiometryczna i otrzymanie widma spektralnego

Intensywności dla każdego z pikseli na otrzymanych obrazach hiperspektralnych (i multispektralnych) są reprezentowane przez wartości numeryczne (z ang. DN – *digit numbers* lub DC – *digital counts*), które stanowią sygnał proporcjonalny do zmiany natężenia prądu w obwodzie elektrycznym detektora powstałym w wyniku rejestracji kwantu (porcji) światła. Wartości DN odzwierciedlają poziom refleksyjności obrazowanej powierzchni, lecz niosą w sobie również informacje o charakterystyce zastosowanego detektora (funkcji wzmocnienia i offsetu) oraz ewentualnej niehomogeniczności oświetlenia. W celu kompensacji tych czynników dokonuje się konwersji DN na wartości refleksyjności w procesie zwanym kalibracją radiometrycz-

na<sup>19</sup>. Proces ów obejmuje kilka etapów, w tym wspomniane wcześniej korekcje prądu ciemnego oraz płaskiego pola, a także kalibrację spektralną.

Kalibracja spektralna prowadzi do wyznaczenia refleksyjności  $\rho(\lambda)$ , którą definiuje się jako proporcję strumienia świetlnego odbitego od powierzchni obrazowanej do padającego na tą powierzchnię strumienia świetlnego:

$$\rho(\lambda)_t = \frac{\phi_{r,t}(\lambda)}{\phi_{i,t}(\lambda)}$$

gdzie:  $\rho(\lambda)_t$  – refleksyjność danego punktu badanego obiektu ( $t$  – z ang. *target*) w jednostkach bezwymiarowych, przyjmuje wartości w zakresie [0–1],

$\phi_{r,t}(\lambda)$  – strumień świetlny odbity od *targetu* ( $r$  – z ang. *reflected*) od powierzchni obrazowanej,

$\phi_{i,t}(\lambda)$  – strumień świetlny padający na *target* ( $i$  – z ang. *incident*) na powierzchnię obrazowaną.

Kalibrację w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem sztucznego oświetlenia wykonuje się stosując wzorce (np. panele Spectralon<sup>20</sup>) odbicia lambertowskiego<sup>21</sup> o znanej refleksyjności w danym zakresie widma EM.

Poniższa zależność opisuje wielkość (intensywność piksela, czyli DN), jaką rejestruje detektor w wyniku pomiaru:

$$DN_\lambda = g\phi_r(\lambda) + b$$

gdzie:  $DN_\lambda$  – wartość jasności piksela dla kanału spektralnego odpowiadającego  $\lambda$ ,

$g$  – współczynnik odpowiadający wzmocnieniu detektora i czasowi akumulacji,

$b$  – offset, czyli wartość bazowa prądu ciemnego.

W przypadku wzorca można zapisać:

$$\rho_r = \frac{\phi_{r,r}}{\phi_{i,r}} = \frac{x}{100}$$

gdzie:  $\rho_r$  – refleksyjność wzorca,  $r$  od referencji,

$\phi_{r,r}$  – strumień świetlny odbity od wzorca,

$\phi_{i,r}$  – strumień świetlny padający na wzorec,

$x$  – procent odbicia, jaki gwarantuje producent wzorca.

19 J. Dyer, G. Verri, J. Cupitt, *op. cit.*; R. Pillay, J. Y. Hardeberg, S. George, *op. cit.*; C. Jones et al., *op. cit.*; D. D. R. Kohler et al., *New approach for the radiometric calibration of spectral imaging systems*, „Optics Express”, vol. 12(11), 2007, s. 2463–2477; M. S. Shaikh et al., *Calibration of a Hyper-Spectral Imaging System Using a Low Cost Reference*, „Sensors (Basel)”, vol. 21(11), 2021.

20 <https://www.labsphere.com/product/spectralon-reflectance-targets/> (dostęp: 20 V 2024).

21 J. H. Lambert, *Photometrie. Photometria sive de mensural de gradibus luminis, colorum et umbrae*, Augsburg, 1760; S. J. Koppal, *Lambertian Reflectance*, w: *Computer Vision*, red. K. Ikeuchi, 2014, s. 441–443.

Kiedy dysponuje się wzorcem o maksymalnym stopniu odbicia, wówczas:

$$\phi_{r,r} = \phi_{i,r}$$

Pamiętając, że pomiary standardu i obiektu są wykonywane w takich samych warunkach, można przyjąć, że:  $\phi_{i,t}(\lambda) = \phi_{i,r}(\lambda)$ . Wobec tego, aby uzyskać refleksję obiektu, należy wykonać operację podzielenia przez obraz wzorca oraz odjąć obraz prądu ciemnego zarówno od obrazu docelowego, jak i od obrazu wzorca:

$$\rho(\lambda)_t = \frac{g\phi_{r,t}(\lambda) - b}{g\phi_{r,r}(\lambda) - b} = \frac{DN_{\lambda,t} - b}{DN_{\lambda,r} - b}$$

Łatwo zauważyć, że w przypadku obrazów hiperspektralnych powyższa operacja zawiera nie tylko kalibrację spektralną, ale i korektę płaskiego pola oraz prądu ciemnego.

### Sposób prezentacji danych hiperspektralnych

Wizualizacja danych wielowymiarowych, jakimi pozostają obrazy hiperspektralne, jest zadaniem niełatwym, gdyż wymaga z reguły wykonania odpowiedniej interpretacji danych zgodnie z postawionym pytaniem badawczym.

Jednym z popularnych sposobów wizualizacji danych hiperspektralnych jest prezentacja map dystrybucji materiałowej. Istnieje wiele różnych strategii, które umożliwiają uzyskanie takich map. Jeżeli wiedza o składzie materiałowym obiektu jest całkowicie nieznana, należy wyznaczyć pewne składowe, które będą reprezentować możliwie największą ilość materiałów tworzących obiekt. W tym celu można wykorzystać algorytm indeksowania pikseli czystych spektralnie (z ang. PPI – *Pixel Purity Index*)<sup>22</sup> lub szereg algorytmów redukujących wymiarowość danych, jak np. algorytmy faktoryzacyjne (w tym analiza składowych głównych PCA – z ang. *Principal Component Analysis*<sup>23</sup> i in.<sup>24</sup>) czy stochastyczną metodę porządkowania sąsiadów w oparciu o rozkład t (z ang. t-SNE – *t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*<sup>25</sup>) lub algorytm oparty na topologicznej analizie danych (z ang. UMAP – *Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimen-*

22 C.-I. Chang, A. Plaza, *A Fast Iterative Algorithm For Implementation of Pixel Purity Index*, „IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters”, vol. 3(1), 2006, s. 63–67.

23 J. Sandak et al., *Nondestructive Evaluation of Heritage Object Coatings with Four Hyperspectral Imaging Systems*, „Coatings”, vol. 11(2), 2021.

24 B. Łach et al., *Application of Factorisation Methods to Analysis of Elemental Distribution Maps Acquired with a Full-Field XRF Imaging Spectrometer*, „Sensors”, vol. 21, 2021.

25 M. Alfeld, *Joint data treatment for Vis-NIR reflectance imaging spectroscopy and XRF imaging acquired in the Theban Necropolis in Egypt by data fusion and t-SNE*, „Comptes Rendus Physique”, vol. 19(7), 2018, s. 625–635.

sion Reduction)<sup>26</sup>. Obszary możliwie czyste spektralnie, które pozostają w kręgu zainteresowań badacza, można również oznaczyć ręcznie poprzez wybranie regionu zainteresowania (z ang. ROI – *Region Of Interest*).

W momencie, kiedy uzyskano widma składowych w obrębie dzieła, można podjąć próbę wyznaczenia map dystrybucji. W tym celu można stosować mapowanie kątem spektralnym (z ang. SAM – *Spectral Angle Mapper*)<sup>27</sup>, zgodnie z przekształceniem:

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^n t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n r_i^2}} \right)$$

gdzie:  $\alpha$  – miara podobieństwa widm, kąt spektralny SAM, przyjmuje wartości z przedziału  $[0-\frac{\pi}{2}]$ , przy czym 0 oznacza widma identyczne,

$t_i$  – intensywność dla i-tego kanału w widmie danego punktu badanego obiektu ( $t$  – z ang. *target*),

$r_i$  – intensywność dla i-tego kanału w widmie referencyjnym (jednym z widm składowych),

$n$  – liczba kanałów spektralnych.

Przy wykorzystaniu SAM należy rozważyć dobierać próg klasyfikacyjny, tj. wartość dla której przyjmuje się, że analizowane widmo można zaklasyfikować tak samo, jak widmo odniesienia. Przykład mapowania kątem spektralnym ukazano na ilustracji 8.

Mapy dystrybucji materiałowej można uzyskać wykorzystując również inne miary podobieństwa widm, jak np. korelację spektralną (z ang. SCM – *Spectral Correlation Mapper*)<sup>28</sup> lub pseudodywergencję Kullback-Leibera (z ang. KLPD – *Kullback-Leiber Pseudo Divergence*)<sup>29</sup>.

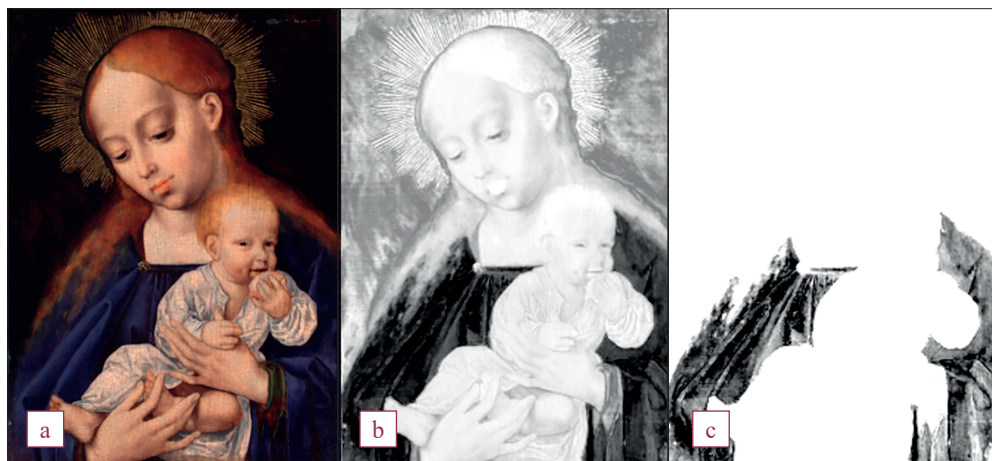
Zastosowanie algorytmów redukujących wymiarowość, jak wspomniane wyżej metody faktoryzacyjne, również może skutkować otrzymaniem dystrybucji materiałowej jako wyniku przekształcenia algorytmem (analiza ładunków czynnikowych i kształtu otrzyma-

26 M. Vermeulen et al., *Application of Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) in spectral imaging of artworks*, „Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy”, vol. 252, 2021.

27 C. Jones et al., *op. cit.*, s. 339–350.

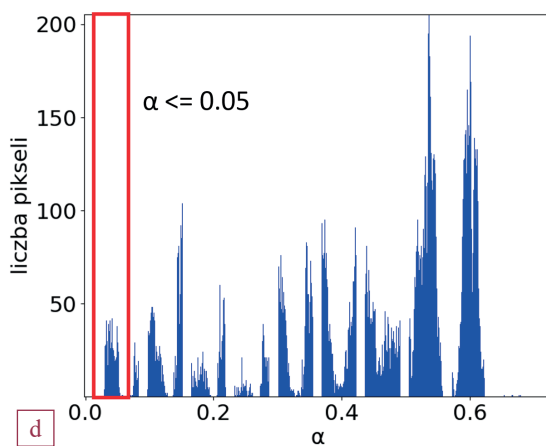
28 B. M. Devassy et al., *Classification of forensic hyperspectral paper data using hybrid spectral similarity algorithms*, „Journal of Chemometrics”, vol. 36(1), 2022.

29 N. Richard et al., *Pseudo-Divergence and Bidimensional Histogram of Spectral Differences for Hyperspectral Image Processing*, „Journal of Imaging Science and Technology”, vol. 60(5), 2016.



il. 8a–d

Mapowanie kątem spektralnym SAM: (a) obraz w świetle widzialnym (*Matka Boska z Dzieciątkiem jedzącym jabłko* Joosa van Cleve’a ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie), (b) mapa wartości współczynnika SAM, (c) mapa SAM dla progu 0.05 – dystrybucja azury, (d) histogram wartości SAM w obrębie obrazu. Na podstawie jego kształtu można iteracyjnie dobierać wartość progu klasyfikacyjnego. W omawianym przypadku wartości skrajne  $\alpha$  to 0.023 oraz 0.7



nych faktorów<sup>30</sup>). Klasteryzacja zredukowanych w wyniku działania t-SNE danych wielowymiarowych także prowadzi do otrzymania map dystrybucji materiałowej<sup>31</sup>.

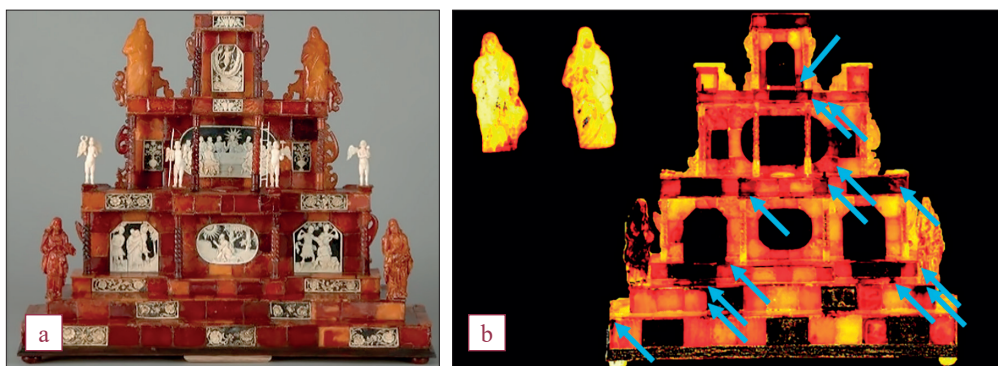
Jeżeli to możliwe, rozkład materiałowy w obrębie dzieła można otrzymać w wyniku całkowania charakterystycznych dla danego materiału struktur spektralnych w widmie<sup>32</sup>. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że wysoka różnorodność w składzie obiektu wpływa na skomplikowany kształt jego widm spektralnych – wiele pasm może interferować i zaburzać wynik końcowy obliczeń.

W przypadku, gdy dostępna jest baza widm referencyjnych, warto rozważyć wykorzystanie algorytmów głębokiego uczenia maszynowego (z ang. DL – *Deep Learning*) i sieci neuronowych (z ang. NN – *Neural*

<sup>30</sup> B. Łach *et al.*, *op. cit.*

<sup>31</sup> M. Alfeld, *op. cit.*

<sup>32</sup> F. Gabrieli *et al.*, *Near-UV to mid-IR reflectance imaging spectroscopy of paintings on the macroscale*, „Science Advances”, vol. 5(8), 2019.



il. 9a–b

Ołtarzyk Męki Pańskiej  
Michaela Schödelocka

ze zbiorów Muzeum  
Narodowego w Krakowie:

(a) fotografia w świetle  
widzialnym badanego obiektu;  
(b) mapa lokalizacji imitacji  
bursztynowych otrzymana na  
podstawie wzoru A. Gollocha,  
w tym przypadku część  
wspólna  $I_1$  oraz  $I_2$

*Networks*)<sup>33</sup>. Badania nad możliwością zastosowania DL i NN identyfikacji materiałowej oraz tworzenia map dystrybucji materiałowej w analizie dzieł sztuki bardzo dynamicznie rozwijają się na przestrzeni ostatnich lat<sup>34</sup>.

Czasami jednak specyfika obiektu wymaga zaangażowania zupełnie innych rozwiązań w zakresie prezentacji pożądanego danych. Wówczas problem należy traktować indywidualnie w oparciu o wnikliwą analizę danych wielospektralnych. Dla przykładu, powyżej (il. 9) przedstawiony został obraz ukazujący miejsca ubytków w plaketach bursztynowych Ołtarza Męki Pańskiej (MNK), który otrzymano w wyniku analizy widmowej. Aby określić lokalizację imitacji bursztynowych, zastosowano wzór zaproponowany przez A. Gollocha<sup>35</sup>:

$$I_{1,2} = \frac{x_{1,2} - a}{b - a}$$

gdzie:  $x_{1,2}$  – intensywność odbicia odpowiednio dla 1415 i 1555 nm,

$a$  – intensywność odbicia dla 1200 nm,

$b$  – intensywność odbicia dla 1315 nm.

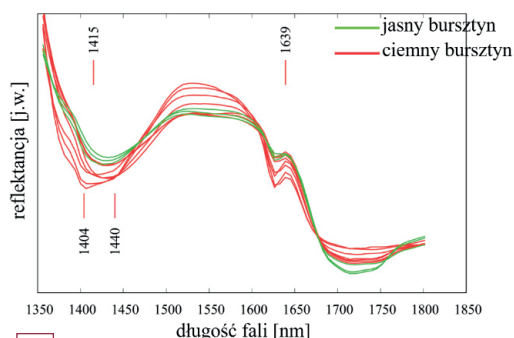
Widmo bursztynu wykazuje się charakterystycznym przebiegiem o szeregu lokalnych maksimów absorpcji dla: 1200, 1415 i 1639 nm oraz maksimum odbicia dla: 1115, 1315, 1555, 1654 nm, a wybrane z nich wyszczególniono w powyższym wzorze. Na podstawie kształtu widma oraz intensywności wyróżnionych pasm można różnicować bursztyn na tle wielu innych żywic.

Miejsca ubytków wypełnionych żywicą syntetyczną identyfikowane są na podstawie wartości współczynników  $I$  ze wzoru A. Gollocha, które

33 E. Pouyet et al., *Artificial Intelligence for Pigment Classification Task in the Short-Wave Infrared Range*, „Sensors”, vol. 21(8), 2021; T. Kleynhans et al., *An alternative approach to mapping pigments in paintings with hyperspectral reflectance image cubes using artificial intelligence*, „Heritage Science”, vol. 8(84), 2020.

34 M. Picollo et al., op. cit.; L. Liu, E. Pouyet et al., *Neural Networks for Hyperspectral Imaging of Historical Paintings. A Practical View*, „Sensors”, vol. 23(5), 2023.

35 A. Golloch, S. Heidbreder, C. Luhr, *Identification of amber and imitations by near infrared reflection spectroscopy*, „Fresenius' Journal of Analytical Chemistry”, vol. 361, 1998, s. 545–546.



il. 10a–c

*Ołtarzyk Męki Pańskiej* Michaela Schödelocka ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie: (a) i (b) obrazy FC bursztynowego ołtarzyka; (a) kanały FC (1515, 1404, 1639 nm) wybrane na podstawie zmian w (c) widmach dwóch klas bursztynów, które tworzą obiekt

pozostają odmienne do tych odpowiadających bursztynowi (konieczne dodatkowe badania referencyjne i porównanie z danymi literaturowymi). Na ilustracji 9b odcienie oranżu wskazują na miejsca identyfikacji bursztynu, czerń to inne materiały, które można znaleźć w obrębie bursztynowego ołtarza oraz tło (wartości  $I$  nie odpowiadają wartościom referencyjnym bursztynu). Część bursztynowych płytek pozostaje zaciemniona – oznacza to, że prawdopodobnie w tym miejscu obecne jest wypełnienie bursztynowego ubytku jego imitacją (przykładowe miejsca oznaczono strzałkami na il. 9b).

Innym popularnym sposobem na prezentację danych hiperspektralnych jest metoda fałszywych kolorów (z ang. FC – *false colors*). Spośród zarejestrowanych obrazów wybiera się trzy, które przypisuje się kolejnym kanałom RGB. Złożenie nie powinno być jednak przypadkowe, a wynikać z charakterystyki spektralnej przedstawianych danych. Istnieją próby normalizacji takiego sposobu wizualizacji obrazów hiperspektralnych<sup>36</sup>, lecz zagadnienie to wciąż pozostaje sporym wyzwaniem ze względu na wysoką kompleksowość badanych obiektów. Przykładowe rozwiązanie wizualizacji FC przedstawiono na ilustracji 10.

36 A. Cosentino, *Effects of different binders on technical photography and infrared reflectography of 54 historical pigments*, „International Journal of Conservation Science”, vol. 6(3), 2015, s. 287–298.

Pierwotnie płytki bursztynowe składały się z bursztynów jasnego i ciemnego ułożonych naprzemiennie, co nie jest już dłużej widoczne (na zdjęciach w świetle widzialnym (il. 9a) oraz obrazach FC z połączonymi kanałami RGB (il. 10b)). Różnice te pozostają jednak nadal widoczne w ich widmach spektralnych – jasne bursztyny wykazują się mniejszą intensywnością pasm przypisywanych obecności kwasu bursztynowego, ponieważ w swojej strukturze posiadają relatywnie więcej inkluzji powietrza<sup>37</sup>.

Wszelkie strategie analizy i sposób otrzymania konkretnej metody wizualizacji powinny zostać poprzedzone odpowiednim opisem motywującym wybór i umożliwiającym odtworzenie procesu w przyszłości. Zachowanie to umożliwiłoby przeprowadzenie podobnej analizy porównawczej w razie potrzeby.

## PODSUMOWANIE

Obrazowanie w szerokim spektrum promieniowania EM stanowi wartościowe narzędzie pozwalające nie tylko wiernie odwzorować fotografowany obiekt, ale również spojrzeć głębiej – odkryć niewidoczne gołym okiem warstwy, ocenić skład materiałowy, technologię wytwarzania, wiek oraz zmiany, które zaszły w czasie, zarówno te wynikające z ingerencji człowieka, jak i niezależnie od niego (degradacja).

Różnica między obrazowaniem wielokanałowym (*multiband imaging*) a obrazowaniem multi- i hiperspektralnym (*multi-/hyperspectral imaging*) leży w kalibracji obrazów względem standardu odbicia, co umożliwia uzyskanie informacji widmowej z każdego punktu obrazu.

Dzięki kalibracji radiometrycznej wartości intensywności pikseli w obrazie odzwierciedlają fizyczne i chemiczne cechy materiałowe badanego obiektu (reflektancję) przy równoczesnej kompensacji wpływów aparaturowych i niejednorodności oświetlenia.

Uzyskanie informacji spektralnej umożliwia przeprowadzenie wyszukanej analizy wielowymiarowych danych, co pozwala odpowiadać na bardzo specyficznie postawione pytania badawcze. Sposób wizualizacji takiego rodzaju danych wymaga zatem ich odpowiedniej interpretacji, co może stanowić wyzwanie ze względu na konieczność znajomości metod analizy obrazów hiperspektralnych. Należy podkreślić również fakt, że trudno jest ustalić uniwersalną strategię sposobu wizualizacji danych, gdyż zależy ona ściśle od badanego obiektu, tj. jego składu i budowy technologicznej.

Aby uzyskać mapy dystrybucji materiałowej badanych obiektów, należy dysponować widmami odniesienia (wewnętrznymi, otrzymanymi

37 P. Krupska-Wolas *et al.*, *SWIR Reflectance Imaging Spectroscopy and Raman Spectroscopy Applied to the Investigation of Amber Heritage Objects. Case Study on the Amber Altar of the Lord's Passion*, w: *The Future of Heritage Science and Technologies*, red. R. Furferi *et al.*, 2023 (Lecture Notes in Mechanical Engineering).

wprost z obrazowanego obiektu, lub zewnętrznymi), które za pomocą np. mapowania SAM zostaną porównane z każdym widmem analizowanego obrazu. Istnieje wiele sposobów na otrzymanie widm składowych wewnętrznych obiektu – ROI, PPI, metody faktoryzacyjne, t-SNE i in. W ostatnich latach popularne stały się również rozwiązania dostarczane przez DL.

Problem uwidocznienia ukrytych warstw wraz ze wskazaniem identyfikacji materiałowej wymaga przeprowadzenia indywidualnej analizy dostosowanej do charakterystyki spektralnej obiektu.

Ważną kwestią jest także odpowiedni opis strategii analizy danych, który zawiera wyjaśnienie motywacji doboru konkretnych algorytmów i pozwala odtworzyć cały proces w przyszłości na wypadek zaistnienia konieczności przeprowadzenia analizy porównawczej.

## BIBLIOGRAFIA

- Abdlaty R., Fang Q., *Acousto-optic tunable filter-based hyperspectral imaging system characterization*, SPIE BiOS 2019, „Design and Quality for Biomedical Technologies XII”, 2019.
- Alfeld M., *Joint data treatment for Vis-NIR reflectance imaging spectroscopy and XRF imaging acquired in the Theban Necropolis in Egypt by data fusion and t-SNE*, „Comptes Rendus Physique”, vol. 19(7), 2018, s. 625–635.
- Alfeld M. et al., *A mobile instrument for in situ scanning macro-XRF investigation of historical paintings*, „Journal of Analytical Atomic Spectrometry”, vol. 28(5), 2013, s. 760–767.
- Catelli E. et al., *Towards the non-destructive analysis of multilayered samples: A novel XRF-VNIR-SWIR hyperspectral imaging system combined with multiblock data processing*, „Analytica Chimica Acta”, vol. 1239, 2023, s. 1–9.
- Chang C.-I., Plaza A., *A Fast Iterative Algorithm For Implementation of Pixel Purity Index*, „IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters”, vol. 3(1), 2006, s. 63–67.
- Cosentino A., *Effects of different binders on technical photography and infrared reflectography of 54 historical pigments*, „International Journal of Conservation Science”, vol. 6(3), 2015, s. 287–298.
- Delaney J. K. et al., *Visible and infrared imaging spectroscopy of paintings and improved reflectography*, „Heritage Science”, vol. 4(6), 2016, s. 1–10.
- Delaney J. K. et al., *Integrated X-ray fluorescence and diffuse visible-to-near-infrared reflectance scanner for standoff elemental and molecular spectroscopic imaging of paints and works on paper*, „Heritage Science”, vol. 6(31), 2018, s. 1–12.
- Devassy B. M. et al., *Classification of forensic hyperspectral paper data using hybrid spectral similarity algorithms*, „Journal of Chemometrics”, vol. 36(5), 2022, s. 1–13.
- Dyer J., Verri G., Cupitt J., *Multispectral Imaging in Reflectance and Photo-induced Luminescence modes. A User Manual*, 2013; <https://www.researchgate.net/publication/317111111>

- chgate.net/publication/267266175\_Multispectral\_Imaging\_in\_Reflectance\_and\_Photo-induced\_Luminescence\_modes\_A\_User\_Manual (dostęp: 20 V 2024).
- Gonzales V. *et al.*, *X-ray Diffraction Mapping for Cultural Heritage Science: a Review of Experimental Configurations and Applications*, „Chemistry. A European Journal”, vol. 26(8), 2020, s. 1703–1719.
- Gabrieli F. *et al.*, *Near-UV to mid-IR reflectance imaging spectroscopy of paintings on the macroscale*, „Science Advances”, vol. 5(8), 2019, s. 1–10.
- Golloch A., Heidebreder S., Luhr C., *Identification of amber and imitations by near infrared reflection spectroscopy*, „Fresenius’ Journal of Analytical Chemistry”, vol. 361, 1998, s. 545–546.
- Hagen N. *et al.*, *Snapshot advantage. A review of the light collection improvement for parallel high-dimensional measurement systems*, „Optical Engineering”, vol. 51, 2012, s. 1–7.
- Hoek C. J. G. van *et al.*, *A SEM-EDS Study of Cultural Heritage Objects with Interpretation of Constituents and Their Distribution Using PARC Data Analysis*, „Microscopy and Microanalysis”, vol. 17(5), 2011, s. 656–660.
- Jablonski A., *Efficiency of Anti-Stokes Fluorescence in Dyes*, „Nature”, vol. 131, 1933, s. 839–840.
- Jones C. *et al.*, *Understanding Multispectral Imaging of Cultural Heritage. Determining Best Practice in MSI analysis of historical artefacts*, „Journal of Cultural Heritage”, vol. 45, 2020, s. 339–350.
- Kleynhans T. *et al.*, *An alternative approach to mapping pigments in paintings with hyperspectral reflectance image cubes using artificial intelligence*, „Heritage Science”, vol. 8(84), 2020, s. 1–16.
- Kohler D. D. R. *et al.*, *New approach for the radiometric calibration of spectral imaging systems*, „Optics Express”, vol. 12(11), 2007, s. 2463–2477.
- Koppal S. J., *Lambertian Reflectance*, w: *Computer Vision*, red. K. Ikeuchi, 2014, s. 441–443.
- Krupska-Wolas P. *et al.*, *SWIR Reflectance Imaging Spectroscopy and Raman Spectroscopy Applied to the Investigation of Amber Heritage Objects. Case Study on the Amber Altar of the Lord’s Passion*, w: *The Future of Heritage Science and Technologies*, red. R. Furferi *et al.*, 2023, s. 401–419 (Lecture Notes in Mechanical Engineering).
- Lakowicz J. R., *Principles of Fluorescence Spectroscopy. Third edition*, 2006.
- Lambert J. H., *Photometrie. Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*, Augsburg, 1760.
- Lee H., Kim M. H., *Building a Two-Way Hyperspectral Imaging System with Liquid Crystal Tunable Filters*, w: *Image and Signal Processing, 6<sup>th</sup> International Conference, ICISP 2014*, 2014, (Lecture Notes in Computer Science, vol. 8509).
- Lee H., *Introduction to Color Imaging Science*, New York 2005.
- Liu L., Pouyet E. *et al.*, *Neural Networks for Hyperspectral Imaging of Historical Paintings. A Practical View*, „Sensors”, vol. 23(5), 2023, s. 1–25.
- Łach B. *et al.*, *Application of Factorisation Methods to Analysis of Elemental Distribution Maps Acquired with a Full-Field XRF Imaging Spectrometer*, „Sensors”, vol. 21(23), 2021, s. 1–19.

- Piccolo M. *et al.*, *Hyper-Spectral Imaging Technique in the Cultural Heritage Field. New Possible Scenarios*, „Sensors”, vol. 20(10), 2020, s. 1–12.
- Pillay R., Hardeberg J. Y., George S., *Hyperspectral Calibration of Art: Acquisition and Calibration Workflows*, „Journal of the American Institute of Conservation”, vol. 58(1), 2019, s. 1–10.
- Pouyet E. *et al.*, *Artificial Intelligence for Pigment Classification Task in the Short-Wave Infrared Range*, „Sensors”, vol. 21(8), 2021, s. 1–11.
- Pust O., *Innovative Filter Solutions for Hyperspectral Imaging*, „Optik & Photonik”, vol. 11(3), 2016, s. 1–4.
- Rene de la Rie E., *Fluorescence of Paint and Varnish Layers (Part I)*, „Studies in Conservation”, vol. 27, 1982, s. 1–7.
- Richard N. *et al.*, *Pseudo-Divergence and Bidimensional Histogram of Spectral Differences for Hyperspectral Image Processing*, „Journal of Imaging Science and Technology”, vol. 60(5), 2016, s. 1–13.
- Rousaki A., Vandenabeele P., *In situ Raman spectroscopy for cultural heritage studies*, „Journal of Raman Spectroscopy”, vol. 52(12), 2021, s. 2178–2189.
- Sandak J. *et al.*, *Nondestructive Evaluation of Heritage Object Coatings with Four Hyperspectral Imaging Systems*, „Coatings”, vol. 11(2), 2021, s. 1–15.
- Shaikh M. S. *et al.*, *Calibration of a Hyper-Spectral Imaging System Using a Low Cost Reference*, „Sensors (Basel)”, vol. 21(11), 2021, s. 1–19.
- Smieska L. M. *et al.*, *Synchrotron-Based High-Energy X-ray MA-XRF and MA-XRD for Art and Archaeology*, „Synchrotron Radiation News”, vol. 32(6), 2019, s. 29–33.
- Striova J. *et al.*, *Reflectance imaging spectroscopy in heritage science*, „La Rivista del Nuovo Cimento”, vol. 43, 2020, s. 515–566.
- Technical Report. Colorimetry*, International Commission on Illumination, 2004, <https://cielab.xyz/pdf/cie.15.2004%20colorimetry.pdf> (dostęp: 20 V 2024).
- Thoury M. *et al.*, *Nondestructive Varnish Identification by Ultraviolet Fluorescence Spectroscopy*, „Applied Spectroscopy”, vol. 61(12), 2007, s. 1–8.
- Vermeulen M. *et al.*, *Application of Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) in spectral imaging of artworks*, „Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy”, vol. 252, 2021; <https://www.labsphere.com/product/spectralon-reflectance-targets/> (dostęp: 20 V 2024).

## SPIS ILUSTRACJI

- s. 202 Schemat stanowiska pomiarowego do obrazowania wielokanałowego/wielospektralnego w trybie odbitym. Kąt padania światła powinien wynosić 45°, tak aby uniknąć odbić zwierciadlanych od obiektu. W zależności od zastosowanego oświetlenia oraz oczekiwanego obrazu wynikowego, można dowolnie modyfikować ułożenie oraz typ stosowanych filtrów pasmowo-przepustowych (co symbolicznie oznaczono za pomocą niebieskich strzałek). Filtry na drodze obiekt–aparat mogą również zostać zastąpione przez odpowiedni układ optyczny wyposażo-

- ny w elementy dyspersyjne i przystosowaną do tego rodzaju akwizycji elektroniczną odczytu; il. Paulina Krupska-Wolas
- s. 204 Wybrany kadr obrazu *Portret Dantego* ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie (MNK XII-218): (a) fragment surowego obrazu niepoddanego przetwarzaniu wstępnemu; (b) obraz prądu ciemnego; (c) obraz białego pola; (d) wynikowy obraz przetworzony. W przypadku obrazów z zakresu widzialnego należy dodatkowo dokonać korekcji względem standardu barwnego (np. wzorzec ColorChecker) celem odpowiedniego odwzorowania kolorów; il. Paulina Krupska-Wolas
- s. 205 Koncepcyjne przedstawienie obrazów (a) wielokanałowych i (b) wielospektralnych, il. Paulina Krupska-Wolas
- s. 206 Fotografia w różnych zakresach promieniowania EM dla obrazu *Studium brodatego chłopca* autorstwa Piotra Michałowskiego ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie (MNK II-a-728), fot. Michał Obarzanowski, Piotr Frączek; il. Paulina Krupska-Wolas na podstawie dokumentacji fot. wykonanej przez M. Obarzanowskiego i P. Frączka
- s. 207 Obraz *Grupa Świętych* Bernarda Daddiego ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie, (MNK XII-180); fot. Michał Obarzanowski i Tomasz Wilkosz
- s. 208 Obraz *Portret Dantego* nieznanego autora ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie (MNK XII-218): u góry – całość, poniżej – wybrany fragment; (a) reflektrogram IR, (b) fotografia w świetle widzialnym; fot. Michał Obarzanowski i Tomasz Wilkosz
- s. 208 Obraz *Droga w lesie* Józefa Chełmońskiego ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie (MNK II-a-432); fot. Michał Obarzanowski i Tomasz Wilkosz
- s. 212 Mapowanie kątem spektralnym SAM: (a) obraz w świetle widzialnym (*Matka Boska z Dzieciątkiem jedzącym jabłko* Joosa van Cleve'a ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie) (MNK XII-255), (b) mapa wartości współczynnika SAM, (c) mapa SAM dla progu 0.05 – dystrybucja azurytu, (d) histogram wartości SAM w obrębie obrazu; il. Paulina Krupska-Wolas na podstawie zdjęć autorstwa Michała Obarzanowskiego i Tomasza Wilkosza
- s. 213 *Ołtarzyk Męki Pańskiej* Michaela Schödelocka ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie (MNK XIII-446): (a) fot. w świetle widzialnym badanego obiektu – Michał Obarzanowski i Piotr Frączek; (b) mapa lokalizacji imitacji bursztynowych otrzymana na podstawie wzoru A. Gollocha, il. Paulina Krupska-Wolas na podstawie zdjęć autorstwa M. Obarzanowskiego i P. Frączka
- s. 214 *Ołtarzyk Męki Pańskiej* Michaela Schödelocka ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie (MNK XIII-446); il. Paulina Krupska-Wolas

**PAULINA KRUPSKA-WOLAS**

<https://orcid.org/0000-0001-8276-380X>

W 2021 roku rozpoczęła studia doktoranckie. Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy wykorzystania sieci neuronowych do identyfikacji materiałowej obiektów zabytkowych z wykorzystaniem obrazowania metodą spektroskopii odbiciowej VNIR/SWIR (RIS) oraz makrospektroskopii XRF (MA-XRF). Ukończyła Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej ze specjalizacją w technikach obrazowania i biometrii. Od 2018 roku współpracuje z Laboratorium Analiz i Badań Nieniszczących Zabytków Muzeum Narodowego w Krakowie. Bada obiekty za pomocą RIS i MA-XRF w celu dostarczenia wiedzy na temat zastosowanych materiałów i technik. Potrafi przeprowadzić wielowymiarową analizę danych i zastosować zaawansowane metody statystyczne zarówno w danych obrazowych, jak i spektroskopii punktowej.

Opracowanie wykonano w ramach prac statutowych Muzeum Narodowego w Krakowie.

Kontakt: [pkrupska@mnk.pl](mailto:pkrupska@mnk.pl)

**MICHAŁ OBARZANOWSKI**

<https://orcid.org/0000-0001-9150-2724>

Absolwent Wydziału Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki ASP w Krakowie. Starszy konserwator w Muzeum Narodowym w Krakowie. Opieka konserwatorska nad obiektami z kolekcji MNK w pełnym zakresie klasycznych i nietypowych materiałów.

Członek zespołów badawczych i konserwatorskich zajmujących się ekspertyzą i badaniami *Sądu Ostatecznego* Hansa Memlinga, *Ekstazy św. Franciszka* El Greca, *Wiejskich chat pośród drzew* Vincenta van Gogha.

Projektant i wykonawca ram mikroklimatycznych dla wielu muzeów polskich. Zaangażowany w prace Laboratorium Analiz i Nieniszczących Badań Obiektów Zabytkowych LANBOZ MNK od 2004 roku – fotografia analityczna, rentgenografia cyfrowa, prowadzenie i udział w projektach w ramach Krajowego Centrum Badań nad Dziedzictwem.

Autor i współautor kilkunastu publikacji i kilkudziesięciu wystąpień konferencyjnych.

Opracowanie wykonano w ramach prac statutowych Muzeum Narodowego w Krakowie.

Kontakt: [mobarzanowski@mnk.pl](mailto:mobarzanowski@mnk.pl)

## **TOMASZ WILKOSZ**

<https://orcid.org/0000-0002-8192-8788>

Doktor nauk chemicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego, jest specjalistą łączącym wiedzę akademicką z praktycznymi zastosowaniami przemysłowymi. Jego wieloletnie doświadczenie obejmuje koordynację i nadzór nad projektami badawczo-rozwojowymi zakończonymi uzyskaniem patentów w dziedzinie katalizy środowiskowej.

Od 2019 roku pełni funkcję specjalisty ds. fotografii analitycznej i rentgenografii w Muzeum Narodowym w Krakowie, gdzie zajmuje się zaawansowanymi badaniami technologicznymi dzieł sztuki oraz przygotowywaniem ekspertyz z zakresu dziedzictwa kultury.

Opracowanie wykonano w ramach prac statutowych Muzeum Narodowego w Krakowie.

Kontakt: [twilkosz@mnk.pl](mailto:twilkosz@mnk.pl)

## **JULIO M. DEL HOYO-MELÉNDEZ**

<https://orcid.org/0000-0003-2163-2149>

Ukończył studia magisterskie z chemii na Uniwersytecie w Houston w USA. Doktorat obronił na Politechnice w Walencji w Hiszpanii w 2010 roku. Od 2011 pracuje w Laboratorium Analiz i Nieniszczących Badań Obiektów Zabytkowych Muzeum Narodowego w Krakowie. Od 2017 roku jest kierownikiem tego laboratorium oraz Krajowego Centrum Badań nad Dziedzictwem. Od roku 2014 jest redaktorem naczelnym czasopisma „Journal of the American Institute for Conservation”.

Opracowanie wykonano w ramach prac statutowych Muzeum Narodowego w Krakowie.

Kontakt: [jdelhoyo@mnk.pl](mailto:jdelhoyo@mnk.pl)

