
Obrazowanie wielospektralne fotografii

DOI: 10.36155/NK.26.00004

Anna Seweryn

seweryn@agh.edu.pl

ORCID: 0000-0003-2351-279X

notes 26_2024
konserwatorski

Summary: Anna Seweryn, *Multispectral imaging of photographs*

The article discusses the meaning and examples of how multispectral imaging techniques can be used to study photographic collections. This non-invasive research technique allows to compile additional information about works of art, of historical value, complex technological structure or in bad condition. The text focuses on the process of multispectral imaging, but it also relates to previous research on imaging of different archival materials. It discusses examples of multispectral imaging various types of photographic prints as well as related problems – from fading of the picture through degradation resulting from fire. The selected examples made it possible to present basic possibilities of using MSI in the context of photographic archive.

Wstęp

Obrazowanie wielospektralne (multispektralne, MSI) coraz częściej pojawia się w literaturze poświęconej badaniu zabytkowych materiałów archiwalnych. Wykorzystanie tej mało inwazyjnej i dość taniej metody badawczej pozwala na uzyskanie dodatkowych informacji o obiekcie i znajduje szczególne zastosowanie w przypadku dokumentów o wysokiej wartości historycznej, technicznie skomplikowanych lub dotkniętych degradacją. Wykonywanie obrazowania przy użyciu kamery multispektralnej oraz zmiennego, wąskopasmowego oświetlenia, stanowi naturalną kontynuację wcześniejszych metod analitycznego fotografowania dzieł sztuki, wspomaganego promieniowaniem ultrafioletowym lub podczerwonym. Proces obrazowania multispektralnego wykracza poza standardowe zadania konserwatora dzieł sztuki czy osoby zajmującej się digitalizacją, jednak specjalistyczna pracownia dedykowana temu procesowi może stanowić miejsce, gdzie potrzeby i zadania z zakresu obu tych dziedzin przenikają się i uzupełniają.

Proces obrazowania wielospektralnego

Obrazowanie wielospektralne jest obecnie wykorzystywane w wielu branżach – od przemysłu i rolnictwa, aż po opiekę nad zabytkami. Systemy obrazowania stosuje się do analizy odpadów w procesie sortowania śmieci¹, wykrywania zanieczyszczeń biologicznych żywności² czy identyfikacji mikroorganizmów³.

-
- 1 K. Tutak, M. Pieszko, *The use of spectra imaging for material identification in waste sorting*, „Archives of Waste Management and Environmental Protection” 2015, t. 17, nr 4, s. 67–78.
 - 2 A. Soni, Y. Dixit, M. M. Reis, G. Brightwell, *Hyperspectral imaging and machine learning in food microbiology: Developments and challenges in detection of bacterial, fungal, and viral contaminants*, „Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety” 2022, 21 (4), s. 3717–3745.
 - 3 J. Le Galudec, M. Dupoy, V. Rebuffel, P. R. Marcoux, *Microbial identification through multispectral infrared imaging of colonies: combining chemical and morphotype analysis*, „Research Square” 2023.

Proces ten wkracza coraz częściej do muzeów, archiwów i bibliotek, gdzie jego zastosowanie pozwala na uchwycenie cech obiektu zabytkowego niewidocznych okiem nieuzbrojonym lub podczas wykonania standardowej fotografii bądź skanu. Ten rodzaj badania i jednoczesnego reprodukowania obiektu zyskuje coraz większą popularność, głównie ze względu na niewielkie koszty oraz małoinwazyjny dla zabytku przebieg badania. Obecnie największym ryzykiem związanym z procesem obrazowania multispektralnego jest narażenie obiektu na uszkodzenia spowodowane ekspozycją na promieniowanie ultrafioletowe. Ekspozycja zabytku na działanie promieniowania ultrafioletowego podczas wykonywania obrazowania przez okres 30 sekund generuje zniszczenia porównywalne z całodzienną ekspozycją obiektu na światło dzienne⁴. Proces obrazowania multispektralnego jest zadaniem złożonym i obejmuje wybór materiału archiwalnego, dostosowanie sprzętu do rozmiaru i typu obiektu, rejestrację sekwencji obrazów oraz obróbkę uzyskanych danych cyfrowych. System pozwala na rejestrację obrazów zapisywanych na monochromatycznej matrycy cyfrowej, przy zastosowaniu oświetlenia emitującego wąskie pasmo elektromagnetyczne. W skład zestawu pozwalającego na wykonanie obrazowania wchodzi kamera multispektralna zaopatrzona w obiektyw i koło filtrów, zestaw lamp generujących oświetlenie o różnej długości fali elektromagnetycznej – od ultrafioletu po podczerwień – oraz komputer wraz z oprogramowaniem⁵. Do obrazowania multispektralnego stosuje się detektory różnego typu, m.in. matryce krzemowe (zmodyfikowane aparaty cyfrowe rejestrujące

4 C. Jones, Ch. Duffy, A. Gibson, M. Terras, *Understanding multispectral imaging of cultural heritage: Determining best practice in MSI analysis of historical artefacts*, „Journal of Cultural Heritage” 2020, nr 45, s. 342.

5 W skład zestawu do obrazowania MSI wykorzystanego na potrzeby opisanych w artykule badań wchodzi: kamera ZWO ASI6200MM Pro, koło filtrów ZWO Electronic Filter Wheel 5×50 mm/2” z filtrami BAADER Planetarium, obiektyw JENOPTIK UV-VIS-IR 60 mm APO, lampy generujące promieniowanie elektromagnetyczne w 12 długościach fali elektromagnetycznej w zakresie 375-940 nm oraz komputer wraz z oprogramowaniem pozwalającym na rejestrację obrazów oraz późniejszą obróbkę danych.

promieniowanie w zakresie 360–1100 nm) oraz specjalistyczne kamery InGaAS rejestrujące obraz w długości fali 900–1700 nm⁶. Efektem działania systemu jest wygenerowanie od kilkunastu do kilkudziesięciu zdjęć, które następnie można analizować poprzez tworzenie wielowarstwowych plików – kostek danych (ang. *data cube*)⁷. Już same oględziny fotografii wykonanych w światłach o wąskim zakresie fal elektromagnetycznych mogą być pomocne przy szukaniu dodatkowych treści, jednak najbardziej znaczący wynik badania widoczny jest w efekcie obróbki komputerowej danych wykonanej przy pomocy specjalistycznych algorytmów. Rodzaj obróbki cyfrowej oraz jej efekty zależne są od zastosowanego oprogramowania, wybranego algorytmu oraz wyselekcjonowanych do analizy plików. Kostki danych można przetwarzać poprzez opcję Analizy Składowych Głównych (ang. *Principal Component Analysis*, PCA), która pozwala na wzmocnienie niektórych elementów zarejestrowanego obrazu. Dzięki tej technice cyfrowe dane obrazowe są kompresowane, a cechy charakterystyczne uwidaczniane. Obrazy przetwarza się także stosując Analizę Niezależnych Składowych (ang. *Independent Component Analysis*, ICA), gdzie dane przekształcane są w nowy, niezależny zbiór⁸. Opcję Liniowa Analiza Dyskryminacyjna (ang. *Linear Discriminant Analysis*, LDA) używa się do wytworzenia obrazów w barwach fałszywych. Obrazy cyfrowe można także

6 A. Cosentino, *Identification of pigments by multispectral imaging: a flowchart method*, „Heritage Science” 2014, nr 2 (8), s. 1.

7 Obrazy multispektralne można opisać jako kostki danych lub zbiory plików zarejestrowanych przy użyciu różnej długości fali, co ok. 50 nm (w odróżnieniu od obrazowania hiperspektralnego, gdzie różnica wynosi 10–20 nm). W najprostszej wersji badania wykonywane są cztery obrazy: w widmie niebieskim, zielonym, czerwonym i podczerwonym, za: A. Tonzini, E. Salerno, A. A-S. Zienab i in., *Analytical and mathematical methods for revealing hidden details in ancient manuscripts and paintings. A review*, „Journal of Advanced Research” 2019, nr 17, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123219300037> [dostęp: 04.02.2024].

8 ICA stosowane jest głównie do uczytelniania warstwy tekstu rękopisów (oddzielenia jej od tła).

analizować za pomocą opcji Spectral Angle Mapper (SAM), która mierzy podobieństwo pomiędzy dwoma plikami (widmami), identyfikuje składowe o podobnych cechach, w tym ujawnia obszary o tożsamej budowie chemicznej. Obrazy MSI analizuje się również nadając im fałszywe barwy, gdzie trzy odpowiednie obrazy są wybierane ze zbioru i nakładane w postaci pokolorowanych warstw. Najczęstszą kombinacją składającą się na plik są fotografie wykonane w podczerwieni, czerwieni i zieleni (IrRG) lub podczerwieni, zieleni i barwie niebieskiej (IrGB)⁹.

W procesie obrazowania MSI szczególnie istotne jest stworzenie odpowiedniego zaplecza badawczego dla obiektów. Obejmuje to przede wszystkim wykonywanie badań w zaciemnionym pomieszczeniu o kontrolowanym klimacie, zapewnienie możliwości bezpiecznego manipulowania obiektem oraz stabilność montażu kamery i lamp w określonym i stałym położeniu. W kontekście materiałów fotograficznych, zarówno negatywów, jak i pozytywów, wykonanych na podłożach transparentnych, konieczne jest także określenie dodatkowego źródła światła (podświetlenia).

Samo wykonanie plików cyfrowych za pomocą kamery multispektralnej jest stosunkowo szybkie i proste. Problemy mogą pojawić się jednak na etapie obróbki komputerowej cyfrowych kostek danych. Ogromna liczba wygenerowanych plików oraz niezliczone możliwe kombinacje poszczególnych warstw wymagają długotrwałej i skrupulatnie udokumentowanej analizy. Darmowe, czasami niedoskonałe programy do obróbki danych oraz duża objętość plików mogą prowadzić do częstych błędów oprogramowania i utraty wyników pracy. Dodatkowo, w przypadku plików wygenerowanych podczas obrazowania zabytkowej fotografii, brakuje dokładnych instrukcji dotyczących polecanych i sprawdzonych metod analizy danych za pomocą konkretnych algorytmów. Ich używanie staje się więc eksperymentalne i często nie przynosi oczekiwanych efektów. Problem stanowi również opis i dokumentacja wykonanych badań, szczególnie w kontekście cyfrowej obróbki danych. Podczas

9 A. Tonazzini, E. Salerno, A. A-S. Zienab i in., *Analytical and mathematical methods...*, wyd. cyt.

publikacji fotografii wygenerowanej przy użyciu specjalistycznego programu do obróbki plików multispektralnych należałoby podać wszelkie informacje pozwalające na odtworzenie drogi prowadzącej do otrzymania danego wyniku badania, w tym rodzaj użytego programu komputerowego i algorytmu, dokładny rodzaj i kolejność ułożenia wykorzystanych obrazów (warstw), wraz z opisaniem oświetlenia zastosowanego podczas wykonywania zdjęcia, filtra oraz rodzaju opcji dodatkowych modyfikujących wprowadzone dane (np. inwersja).

Zastosowanie obrazowania wielospektralnego

Obrazowanie wielospektralne stosowane jest przez badaczy z wielu dziedzin z zakresu sztuki. Badania wykonane za pomocą kamery multispektralnej służą jak najlepszemu poznaniu obiektu zabytkowego, w tym określeniu budowy technologicznej czy przebytej historii przekładającej się na stan zachowania zabytku, a także dokumentują ten stan zachowania przed i po konserwacji. Generowanie cyfrowych obrazów spektralnych pozwala uczytelnić dokumenty na zdegradowanych podłożach, odczytać filigrany, rozróżnić atramenty i media pisarskie, dotrzeć do treści zakrytych przez infekcję mikrobiologiczną lub zabrudzenia. Obrazowanie może być także pomocne jako narzędzie do skrupulatnej dokumentacji wizualnej przeprowadzonych prac konserwatorskich i oszacowania stanu obiektu przed i po wykonanych zabiegach¹⁰, jak również wspomóc proces odczytywania dokumentów intencyjnie zniszczonych bądź uszkodzonych podczas pożaru czy w wyniku zalania¹¹. W historii badania i obrazowania dokumentów i innych dzieł sztuki już od początku XX wieku spotykamy się z zastosowaniem

¹⁰ K. D. Chlebda, T. Łojewski, *Obrazowanie hiperspektralne w analizie dokumentów i konserwacji sztuki*, „Notes Konserwatorski” 2016, nr 18, s. 63.

¹¹ T. Łojewski, M. Maciaszczyk, W. Płosa, *Uczytelnienie zapisków Marcela Nadjary’ego, więźnia obozu Auschwitz-Birkenau, metodą obrazowania multispektralnego*, „Notes Konserwatorski” 2022, nr 24, s. 59–74.

promieniowania ultrafioletowego¹² czy bliskiej podczerwieni¹³. Badacze operujący systemami do obrazowania multispektralnego skupiają się zazwyczaj na analizie pojedynczych, unikatowych zabytków piśmiennictwa czy malarstwa. Do jednych z najszlachetniejszych badań dokumentów zaliczyć możemy odczytanie palimpsestu z kodeksu C Archimedes¹⁴ czy odkrycie niuansów Deklaracji Niepodległości Thomasa Jeffersona¹⁵. Badania rękopisów są zazwyczaj efektywne i pozwalają na uzyskanie dodatkowych informacji, ponieważ podłoża dokumentów oraz media pisarskie różnie oddziałują z różnymi długościami fali elektromagnetycznej, np. atrament żelazowo-galusowy odbija światło podczerwone, a materiały pisarskie na bazie węgla absorbują je, co w znaczący sposób zmienia czytelność pierwotnego obiektu na obrazie cyfrowym¹⁶. System pozwala także na rejestrację przebarwień i zmian właściwości optycznych materiałów piśmienniczych¹⁷.

¹² W przypadku zbiorów fotograficznych promieniowanie ultrafioletowe wykorzystywano do identyfikacji powłok, lokalizacji występowania *foxingu* czy identyfikacji obszarów występowania retuszy i kolorowania oraz identyfikacji korozji powierzchniowej, za: L. A. Daffner, D. Kushel, J. M. Messinger, *Investigation of surface tarnishing found on 19th-century daguerreotypes*, „JAIIC online, Journal of the American Institute for Conservation” 1996, t. 35, nr 1, s. 9–21.

¹³ A. D. Kushel, *Transmitted Infrared Radiation to the Examination of Artifacts*, „Studies in Conservation” 1985, t. 30, nr 1, s. 1–10.

¹⁴ R. L. Easton Jr., W. Noel, *The multispectral imaging of the Archimedes palimpsest*, „Gazette du livre médiéval” 2004, nr 45, s. 39–49, https://www.persee.fr/doc/galim_0753-5015_2004_num_45_1_1646 [dostęp: 04.02.2024].

¹⁵ F. G. France, T. B. Toth, *Spectral Imaging for revealing and preserving world cultural heritage*, materiały z konferencji „19th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2011)”, 2011, s. 1452–1453, https://www.researchgate.net/publication/267995180_Spectral_imaging_for_revealing_and_preserving_world_cultural_heritage [dostęp: 04.02.2024].

¹⁶ C. Jones, Ch. Duffy, A. Gibson, M. Terras, *Understanding multispectral imaging of cultural heritage: Determining best practice in MSI analysis of historical artefacts*, „Journal of Cultural Heritage” 2020, nr 45, s. 340.

¹⁷ Do badań wybrano MSI jako metodę niewymagającą pobrania próbek z obiektów zabytkowych, a badaniu poddano rękopisy (XVII–XX w.) wykonane atramentem żelazowo-galusowym. Dzięki badaniu naukowcy są w stanie oszacować datę powstania obiektu, a badania proponują

Wykonywanie kopii cyfrowych materiałów archiwalnych oraz dzieł sztuki lub same ich oględziny przeprowadzone za pomocą systemów do obrazowania multispektralnego są także wykorzystywane w celu ustalenia autentyczności dokumentu czy uzyskania materiałów dowodowych przez laboratoria kryminalistyczne¹⁸. Obrazowanie łączy się również z innymi metodami badawczymi, jak np. z RTI, które pozwala powiązać fakturę obiektu z informacją o jego barwie¹⁹.

Obrazowanie wielospektralne zabytkowych fotografii

Do dziś brakuje publikacji przekrojowo traktujących temat obrazowania wielospektralnego w kontekście zabytkowych fotografii²⁰. Spośród nielicznych

poszerzyć o modelowanie i symulację degradacji atramentów w czasie. Dzięki analizie matematycznej uzyskanych plików udało się uzyskać korelacje między obiektami zabytkowymi i datą ich wytworzenia (a więc technika może być stosowana do określania daty powstania obiektu), za: A. Rahiche, R. Hedjam, S. Al-maadeed, M. Cheriet, *Historical document dating using multispectral imaging and ordinal classification*, „Journal of Cultural Heritage” 2020, nr 45. 18 Tamże, s. 30.

19 Istotnym zagadnieniem w dokumentacji dzieł sztuki jest poznanie definicji koloru jako potrzeby obiektywnej identyfikacji koloru w zakresie jego reprodukcji oraz definicji odwzorowania, czyli wizualizacji koloru w danej strukturze (teksturze powierzchni obiektu). Istnieje potrzeba rozwijania badań i programów, które połączą świat rzeczywisty z wirtualnym, gdzie zostaną odzwierciedlone kształty i właściwości materiałowe modelowej płaszczyzny. Podczas analizy barwnej dzieła sztuki autorzy polecają brać pod uwagę kolor obiektu, połysk powierzchni, jej chropowatość, rozmiar i kształt zabytku, a także kontrastowość poszczególnych elementów, za: M. Gaiani, I. A. Fabrizio, A. Ballabeni, *Cultural and architectural heritage conservation and restoration: which color?*, „Coloration Technology” 2020, nr 137.

20 Istnieją opisy zastosowania obrazowania wielo- i hiperspektralnego przy projektach dotyczących zbiorów fotograficznych, jednak zazwyczaj ograniczają się do opisanego wykorzystanych sprzętów i skąpej konkluzji z badań, np.: M. Picollo, C. Cucci, A. Casini, L. Stefani, *Hyperspectral Imaging applied to the study of negative and positive films*, materiały z konferencji „Colour Photography and Film: Sharing knowledge of analysis, preservation, conservation, migration of analogue and digital materials”, 2021, s. 217–219.

prac poświęconych tej tematyce można wymienić skromne badania obrazowania poświęcone dagerotypii²¹ oraz ostatnie opracowanie dotyczące zespołu retuszowanych odbitek fotograficznych²², jak też pokrewnych z fotografią kart pocztowych²³. O ile obrazowanie rękopisów, w tym palimpsestów, przynosi w wielu sytuacjach dobre rezultaty, a niewidoczna pierwotnie treść staje się czytelna, o tyle trudno przewidzieć możliwości rejestracji i przetwarzania obrazu fotograficznego. Zaletą rękopisów w przypadku tego typu procesu jest kontrast, technologiczny i spektralny, pomiędzy medium pisarskim a podłożem. Ślad pozostawiony przez narzędzie pisarskie także powoduje różnice spektralne czytelne dla kamery i oprogramowania. Sposób wytworzenia fotografii, gdzie cząsteczki obrazu zatopione są w głąb gładkiej i jednolitej warstwy spoiwa, może być pewnym utrudnieniem podczas procesu rejestracji. Hipotetycznie, większą czytelność utworzonych plików powinniśmy móc osiągnąć przy obrazowaniu technik fotograficznych charakteryzujących się różnicą powierzchni partii światła i cieni, jak w dagerotypii czy technikach

²¹ D. Goltz, G. Hill, *Hyperspectral Imaging of Daguerreotypes*, „Topics in Photographic Preservation” 2011, nr 14, s. 194 oraz <https://chsource.org/photographic-materials/> i <https://iconphmgblog.wordpress.com/2021/01/28/using-multimodal-imaging-and-machine-learning-to-understand-hand-coloured-photographs/> [dostęp: 04.02.2024].

²² R. Sharma, *Daubing Titipu, Colourants in Japanese Albumen Prints*, Uniwersytet w Amsterdamie, 2020. Praca magisterska dotycząca badania albumu fotograficznego z kolorowanymi odbitkami albuminowymi z Japonii.

²³ Przedmiotem badań były karty pocztowe produkowane w Grecji na początku XX wieku. W badaniu porównywano kolekcję kart (pozbawionych datacji) pochodzącą ze zbiorów instytucji z materiałami ze zbiorów prywatnych oznaczonymi konkretną datą. Badanie było prowadzone w skali mikroskopowej, a jego celem było odnalezienie cech wspólnych i różnic między zbiorami, które mogą pomóc w procesie zadatowania konkretnych obiektów, za: V. Kokla, *Assesing historical printed materials using the combination of historical information and imaging techniques. Case study: Greek postcards of the early 20th century*, „International Circular of Graphic Education and Research” 2021, nr 13.

opartych o sole dwuchromianowe²⁴. Ze względu na technologiczną różnorodność każda z technik fotograficznych powinna doczekać się osobnego opracowania, podobnie jak każdy z różnych problemów badawczych z nią związanych – od blaknięcia obrazu, przebarwień, śladów infekcji mikrobiologicznej, po degradację związaną ze zniszczeniami powstałymi na skutek wystąpienia katastrofy. W efekcie prac przeprowadzanych przy obrazowaniu fotografii powinna powstać biblioteka danych pozwalająca na określenie zastosowania najskuteczniejszej metody oświetlenia obiektu, jak i najwłaściwszej kombinacji algorytmów w celu uzyskania poszukiwanych przez nas informacji. Dane zawarte w bibliotece mogłyby pomóc w identyfikacji technologii wykonania fotografii, dotarciu do treści czy rejestracji konkretnego rodzaju zniszczeń. Decydując się na wykonanie obrazowania multispektralnego, musimy mieć świadomość, że odtworzenie nieczytelnych treści nie będzie szło w parze z zachowaniem pierwotnej barwy obiektu, co niestety może przeszkadzać w odbiorze całości. Jednocześnie oprogramowanie komputerowe pozwala na połączenie zarejestrowanych składowych obrazu i utworzenie kostki danych odtwarzającej obraz w skali barwnej RGB (fot. 1).

Sposób wytwarzania plików w badaniu umożliwia ich analizę przed przystąpieniem do procesu obróbki kostek danych. Już samo zapoznanie się z pojedynczymi, surowymi obrazami, może dostarczyć nam nowych informacji o badanym obiekcie. Jednym z celów obrazowania może być uczynienie niewidocznych treści, wyblakłego lub zakrytego zanieczyszczeniami obrazu, w przypadku fotografii wykonanego ze związków srebra, żelaza, barwników lub pigmentów. Dobre efekty w uwydatnieniu obrazu można uzyskać w przypadku zniszczonych fotografii wykonanych w technice cyjanotypii. Znaczący wzrost

²⁴ W przypadku dagerotypów warstwa obrazu zbudowana z amalgamatu rtęciowo-srebrowego osadzona na powierzchni posrebrzanego podłoża będzie w sposób kontrastowy odbijała promieniowanie i przez to najprawdopodobniej pozwoli na rejestrację i odczytanie detali obrazu. Podobnie powinno być z fotografiami wykonanymi na bazie soli dwuchromianowych i pigmentów, gdzie warstwa obrazu będzie miała strukturę analogiczną z warstwą malarską.

kontrastowości obrazu uzyskujemy podczas rejestracji fotografii przy zastosowaniu oświetlenia o długości fali elektromagnetycznej 410 nm i z użyciem filtra czerwonego (fot. 2). Pozytywny wynik podczas próby zarejestrowania kontrastu pomiędzy tłem a obrazem zyskujemy dzięki indywidualnym cechom papierowego podłoża odbitek fotograficznych, m.in. luminescencji spowodowanej dodawaniem wybielaczy optycznych do masy papierowej lub warstwy barytowej. Jej obserwacja może pomóc nam również w zadatowaniu obiektu, a także w odróżnieniu oryginałów od późniejszych replik czy dubletów.



Fot. 1.

Odbitka barwna chromogeniczna poddana procesowi obrazowania multispektralnego. Opis zgodnie z ruchem wskazówek zegara: reprodukcja odbitki oryginalnej wykonana aparatem cyfrowym Canon EOS 5D Mark III; fotografia wykonana systemem MSI przy długości fali elektromagnetycznej 375 nm z zastosowaniem filtra czerwonego – widoczny wzrost czytelności detalu szczególnie w partiach objętych infekcją mikrobiologiczną; fotografia wykonana systemem MSI przy długości fali elektromagnetycznej 375 nm z zastosowaniem filtra UV – widoczne uczytlnienie zakresu występowania infekcji mikrobiologicznej; fotografia wykonana systemem MSI oraz za pomocą programu HOKU – odtworzenie barw pierwotnych obiektu poprzez złączenie trzech składowych odpowiedzialnych za kanały barwne RGB (fot. A. Seweryn)

Praca z fotografią srebrową jest mniej przewidywalna, a efekt wzmocnienia kontrastu w obrazie trudniejszy do zauważenia. Aby go zaobserwować najlepiej wykonać próby na fotografiach zawierających w treści obrazu napisy (np. szyldy sklepów, afisze), a czytelność następuje zazwyczaj podczas wykonywania zdjęć przy oświetleniu w zakresie fal 375–480 nm.



Fot. 2.

Próby czytelności zdegradowanego obrazu fotograficznego wykonanego w technice cyjanotypii (fotografia współczesna). Po lewej – reprodukcja odbitki oryginalnej wykonana aparatem cyfrowym Canon EOS 5D Mark III (prawa połowa poddana działaniu zasady w celu degradacji obrazu). Po prawej stronie obraz uzyskany dzięki obrazowaniu MSI przy zastosowaniu oświetlenia o długości fali 410 nm i z użyciem filtra czerwonego (fot. A. Seweryn)

Obrazowanie multispektralne może być użyte do prób odczytania zdjęć nie tylko wyblakłych, ale także zakrytych przez brud, infekcję mikrobiologiczną czy też produkty degradacji fizykochemicznej obrazu fotograficznego. Jednym z typowych zniszczeń występujących na materiałach żelatynowo-srebrowych jest efekt lustra srebrowego. *Silver mirroring* to wynik migracji jonów srebra, do której dochodzi w obiekcie na skutek obecności zanieczyszczeń chemicznych, nieodpowiedniej temperatury oraz podwyższonej wilgotności względnej

powietrza. Obecność srebra metalicznego na powierzchni warstwy obrazu zakłóca swobodny odbiór jego treści: na odbitkach fotograficznych, w partiach intensywnie zaciemnionych, daje efekt błękitnego połysku, a na negatywach widzianych w świetle przechodzącym, ujawnia się jako zażółcenie. Wykonanie fotografii za pomocą kamery multispektralnej przy oświetleniu o długości fali 375 nm, 410 nm oraz 940 nm pozwala na odczytanie zakrytych treści. Podobnie użycie analizy komputerowej pomogło w odczytaniu zamazanych postaci oraz detali tła uchwyconych pierwotnie na zdjęciu (fot. 3). Do analizy wykorzystano opcję PCA w programie HOKU oraz zdjęcia wykonane przy oświetleniu 375 nm (z filtrem niebieskim) i 525 nm (z filtrem zielonym) – (jako input) oraz 525 nm i 632 nm (jako ROI) wraz z inwersją wszystkich warstw.



Fot. 3. Fotografia żelatynowo-srebrowa z widoczną degradacją obrazu srebrowego (ang. *silver mirroring*), miejscowo usuniętym mechanicznie. U góry reprodukcja odbitki oryginalnej wykonana aparatem cyfrowym Canon EOS 5D Mark III. Na dole obraz uzyskany dzięki obrazowaniu MSI (obróbka w programie HOKU), (fot. A. Seweryn)

Jednym z powszechnie występujących rodzajów zniszczeń obecnych na fotografiach na podłożu papierowym jest *foxing* – miejscowe przebarwienie w rdzawym kolorze. *Foxing* jest wynikiem występowania w strukturze papieru mikroorganizmów i/lub związków żelaza, które z czasem migrują do lica obiektu i stają się widoczne. Jest to jeden z typów zniszczeń, które mogą zniekształcić odbiór fotografii i sprawić, że jej pierwotna treść stanie się nieczytelna. Rejestracja obrazów fluorescencji indukowanej promieniowaniem UV pozwala na określenie miejsc jeszcze nieujawnionych przebarwień. Na obrazach rejestrowanych w zakresie fal podczerwonych produkty degradacji przestają być widoczne, a obraz zyskuje na czytelności (fot. 4).



Fot. 4.

Efekt wykonania obrazowania multispektralnego dla fotografii wytworzonej w technice albuminowej, z widocznymi uszkodzeniami partii obrazu, tzw. *foxingiem*. Kolejno widoczne: reprodukcja wykonana w świetle VIS, z użyciem promieniowania o długości 375 nm z filtrem UV, promieniowania 375 nm z filtrem czerwonym oraz z użyciem promieniowania 850 nm (fot. A. Seweryn)

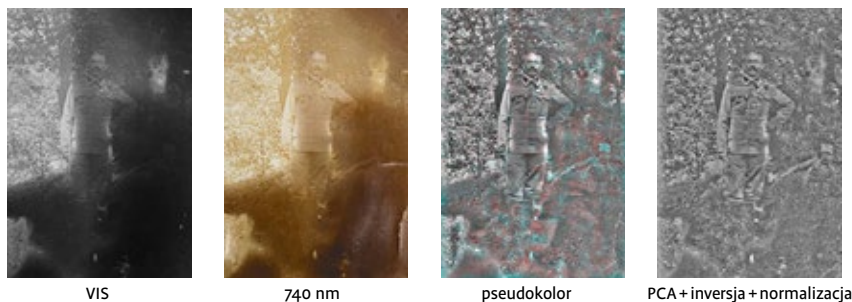
W przypadku odbitek albuminowych, charakteryzujących się niewielką grubością podłoża papierowego, podczas wykonywania procesu obrazowania multispektralnego zaobserwowano możliwość dotarcia do treści znajdujących się na kartonowym podłożu – tekst ujawnił się w świetle podczerwonym (850 nm), a następnie został wzmocniony podczas obróbki cyfrowej danych z zastosowaniem metody ICA (fot. 6). Uczytelnienie zapisków znajdujących się pod papierowym podłożem fotografii daje nadzieję na odczytanie informacji zawartych na niedostępnych obecnie odwrociach obiektów, np. wklejonych w albumy fotograficzne.



Fot. 5.

Efekt wykonania obrazowania multispektralnego dla fotografii wytworzonej w technice albuminowej (reprodukcja grafiki). Kolejno widoczne: reprodukcja wykonana w świetle VIS, z użyciem promieniowania o długości 375 nm z filtrem czerwonym oraz z użyciem promieniowania 850 nm, a także uczynienie zapisków na kartonie dzięki zastosowaniu obróbki komputerowej plików (fot. A. Seweryn)

Kolejnym ważnym zagadnieniem w odczytywaniu fotografii jest przywrócenie treści obiektów uszkodzonych w wypadku wystąpienia katastrofy. Dotarcie do archiwaliów uległych zniszczeniu w wyniku działania wody w przypadku najliczniejszych w zasobach fotografii żelatynowo-srebrowych będzie wymagało odczytania niewielkiej ilości treści zachowanej w często rozpuszczonej warstwie obrazu fotograficznego. W przypadku obiektów spalonych obraz może być zbrunatniały, zdeformowany lub pokryty nalotem z sadzy, który może częściowo zostać zniwelowany przy zastosowaniu promieniowania podczerwonego i obróbki cyfrowej plików (fot. 6).



Fot. 6.

Uczytnienie fotografii żelatynowo-srebrowej dotkniętej zniszczeniami w wyniku wystąpienia pożaru. Kolejno widoczne: reprodukcja wykonana w świetle VIS, z użyciem promieniowania o długości 740 nm oraz dwa wyniki analizy plików cyfrowych – wersja *pseudokolor* oraz *PCA* (fot. A. Seweryn)

Wykonanie obrazowania z zastosowaniem opcji pseudokoloru oraz normalizacji pozwoliło na otrzymanie czytelniejszych partii ukrytego wcześniej obrazu, przy czym wygenerowany obraz (szczególnie w drugiej ze wspomnianych opcji) pozbawiony jest typowej dla fotografii ciągłości tonalnej, a krawędzie postaci i partie nieczytelne pokrywa „cyfrowy szum”.

Zakończenie

Obrazowanie wielospektralne ma szerokie zastosowania, a projekty oparte na zebranych danych często stanowią interdyscyplinarne wyzwania, łączące w sobie wiedzę na temat technologii obiektu, jego treści oraz procesów degradacji. Wykorzystanie systemu obrazowania multispektralnego jest nieocenione w odczytywaniu treści uszkodzonych i nieczytelnych obiektów, wpisując się jednocześnie w ideę powolnej digitalizacji²⁵, czyli procesu kładącego większy nacisk na pełne zrozumienie analizowanego dokumentu niż jedynie na reprodukcję i udostępnienie jego zawartości. Powolna digitalizacja pozwala również na dodatkową ocenę dotychczasowych schematów i zaleceń stosowanych w instytucjach kultury w zakresie procesów tworzenia i udostępniania treści cyfrowych²⁶. Choć metoda digitalizacji jest już dobrze opracowana i powszechnie stosowana w Polsce, obrazowanie multispektralne wciąż wymaga dalszego rozwoju, aby stać się powszechnie akceptowaną praktyką w instytucjach przechowujących zbiory archiwalne. Istotnym jest rozpoznanie możliwości zastosowania obrazowania wielospektralnego przy jednoczesnej krytyce i racjonalnym przyjrzeniu

²⁵ D. Jutrzenka-Supryn, J. Czuczko, *Digitalizacja zabytkowych książek – nowe spojrzenie, nowe możliwości*, „Notes Konserwatorski” 2023, nr 25, s. 83.

²⁶ A. Prescott, L. Hughes, *Why we digitize? The case for slow digitization*, „Archive Journal” September 2018, <https://www.archivejournal.net/essays/why-do-we-digitize-the-case-for-slow-digitization/> [dostęp: 04.02.2024]. Autorzy tekstu zaznaczają, że wszelkie archiwalne, jednostkowe obiekty powinny być poddane specjalistycznym metodom obrazowania, w odróżnieniu od współczesnych zbiorów bibliotecznych, w których wystarczającym procesem jest cyfrowe, masowe powielenie tekstu.

się bilansowi zysków i strat towarzyszących przeprowadzaniu tego procesu na obiektach zabytkowych. Jedną z nieomawianych stron procesu jest wciąż zbada- nie błędów, które – jak w przypadku każdego badania analitycznego – przecież występują, a na których wykrycie, ze względu na pracę w środowisku cyfrowym, możemy mieć ograniczony wpływ.

W kontekście zabytkowej fotografii, obszar zastosowania obrazowania mul- tispektralnego pozostaje szeroki i wciąż nie do końca zbadany. Aby ocenić uży- teczność systemu MSI w procesie reprografii historycznych fotografii, konieczne są szczegółowe i dobrze udokumentowane badania, a także sprawdzenie dostęp- nych urządzeń i oprogramowania, których na rynku pojawia się coraz więcej. Potencjał tej technologii w ochronie i odtwarzaniu dziedzictwa kulturowego jest obiecujący, dalsze badania i rozwój zaś przyniosą zapewne jeszcze wiele korzyści dla dziedziny konserwacji i digitalizacji zabytkowych zbiorów fotograficznych.

Bibliografia

- Chlebda K. D., Łojewski T., *Obrazowanie hiperspektralne w analizie dokumentów i kon- serwacji sztuki*, „Notes Konserwatorski” 2016, nr 18.
- Cosentino A., *Identification of pigments by multispectral imaging: a flowchart method*, „Heritage Science” 2014, nr 2.
- Daffner L. A., Kushel D., Messinger J. M., *Investigation of surface tarnishing found on 19th-century daguerreotypes*, „JAIC online, „Journal of the American Institute for Con- servation” 1996, t. 35, nr 1.
- Easton R. L. Jr., Noel W., *The multispectral imaging of the Archimedes palimpsest*, „Gazette du livre médiéval” 2004, nr 45.
- France F. G., Toth T. B., *Spectral imaging for revealing and preserving world cultural heritage*, materiały z konferencji „19th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)”, 2011.
- Gaiani M., Fabrizio I.A., Ballabeni A., *Cultural and architectural heritage conservation and restoration: which color?*, „Coloration Technology” 2021, t. 137, nr 1.
- Goltz D., Hill G., *Hyperspectral Imaging of Daguerreotypes*, „Topics in Photographic Pre- servation” 2011, t. 14.

- Jones C., Duffy Ch., Gibson A., Terras M., *Understanding multispectral imaging of cultural heritage: Determining best practice in MSI analysis of historical artefacts*, „Journal of Cultural Heritage” 2020, nr 45.
- Jutrzenka-Supryń D., Czuczko J., *Digitalizacja zabytkowych książek-nowe spojrzenie, nowe możliwości*, „Notes Konserwatorski” 2023, nr 25.
- Kokla V., *Assesing historical printed materials using the combination of historical information and imaging techniques. Case study: Greek postcards of the early 20th century, 2021, International Circular of Graphic Education and Research*, „International Circular of Graphic Education and Research” 2021, nr 13.
- Kushel A. D., *Transmitted Infrared Radiation to the Examination of Artifacts*, „Studies in Conservation” 1985, t. 30, nr 1.
- Le Galudec J., Dupoy M., Rebuffel V., Marcoux P. R., *Microbial identification through multispectral infrared imaging of colonies: combining chemical and morphotype analysis*, „Research Square” 2023.
- Łojewski T., Maciaszczyk M., Płosa W., *Uczytelnienie zapisków Marcela Nadjary’ego, więźnia obozu Auschwitz-Birkenau, metodą obrazowania multispektralnego*, „Notes Konserwatorski” 2022, nr 24.
- Piccolo M., Cucci C., Casini A., Stefani L., *Hyperspectral Imaging applied to the study of negative and positive films*, materiały z konferencji „Colour Photography and Film. Sharing knowledge of analysis, preservation, conservation, migration of analogue and digital materials”, 2021.
- Prescott A., Hughes L., *Why do we digitize? The case for slow digitization*, „Archive Journal” wrzesień 2018.
- Rahiche A., Hedjam R., Al-maadeed S., Cheriet M., *Historical document dating using multispectral imaging and ordinal classification*, „Journal of Cultural Heritage” 2020, nr 45.
- Sharma R., *Daubing Titipu, Colourants in Japanes Albumen Prints*, Uniwersytet w Amsterdamie, 2020.
- Soni A., Dixit Y., Reis M. M., Brightwell G., *Hyperspectral imaging and machine learning in food microbiology: Developments and challenges in detection of bacterial, fungal, and viral contaminants*, *Comprehensive reviews in food science and food safety*, „Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety” 2022, 21 (4).

Tonazzini A., Salerno E., Zienab A. A-S. i in., *Analytical and mathematical methods for revealing hidden details in ancient manuscripts and paintings. A review*, „Journal of Advanced Research” 2019, nr 17.

Tutak K., Pieszko M., *The use of spectra imaging for material identification in waste sorting*, (*Wykorzystanie obrazowania spektralnego do identyfikacji materiałów na potrzeby sortowania odpadów*), „Archives of Waste Management and Environmental Protection” 2015, t. 17, nr 4.