

Szmit-Naud, Elżbieta

Wrażenie barwy i klasyfikacja barw : ocena zmian barwy materiałów stosowanych w konserwacji i restauracji dzieł sztuki

Acta Universitatis Nicolai Copernici. Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo 34 (357),
39-63

2005

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach
dozwolonego użytku.

Instytut Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa UMK

Zakład Konserwacji Malarstwa i Rzeźby Polichromowanej

Elżbieta Szmit-Naud

WRAŻENIE BARWY I KLASYFIKACJA BARW.
OCENA ZMIAN BARWY MATERIAŁÓW
STOSOWANYCH W KONSERWACJI I RESTAURACJI
DZIEŁ SZTUKI

W konserwację i restaurację dzieł sztuki, w szczególności dzieł malarstwa, wpisany jest kontakt z różnorodnymi powierzchniami barwnymi, stanowiącymi materię dzieła sztuki i decydującymi o jego estetycznym i artystycznym wyrazie. Problem zmian barwy oryginalnej materii w procesie starzenia, dostosowanie barwne i stabilność materiałów używanych w procesie konserwacji i restauracji podnoszone są w licznych pracach badawczych. Aspekt barwy i jej zmian ma szczególne znaczenie w przypadku materiałów wprowadzanych w materię zabytkową, zwłaszcza w sposób nieodwracalny czy mało odwracalny – jak roztwory żywic w procesie konsolidacji, czy w postaci uzupełnień ubytków, jak kity, farby, pigmenty i spoiwa, werniksy stanowiące warstwy izolujące. Obok wielu właściwości chemicznych i fizycznych często bardzo istotne znaczenie, ostatecznie decydujące o ocenie przydatności tych materiałów do konserwacji i restauracji dzieł sztuki, ma właśnie barwa i jej niezmiennosc w czasie. Punktem wyjścia ewaluacji stabilności barwnej jest zawsze wzrokowa obserwacja. Rokowanie na jej podstawie o „dobrym” lub „złym” zachowaniu danego materiału w kontekście ewentualnych zmian barwnych bywa niejednokrotnie utrudnione wskutek niejednoznaczności i braku precyzji stosowanych określeń, wynikających po prostu z trudności z nazwaniem zarejestrowanych wrażeń i subiektywizmu oceny. W sukurs przychodzi wówczas ocena oparta na instrumentalnych pomiarach barwy. Jednakże by móc ją efektywnie praktycznie wykorzystać, konieczne jest rozumienie podstawowych pojęć barwometrii

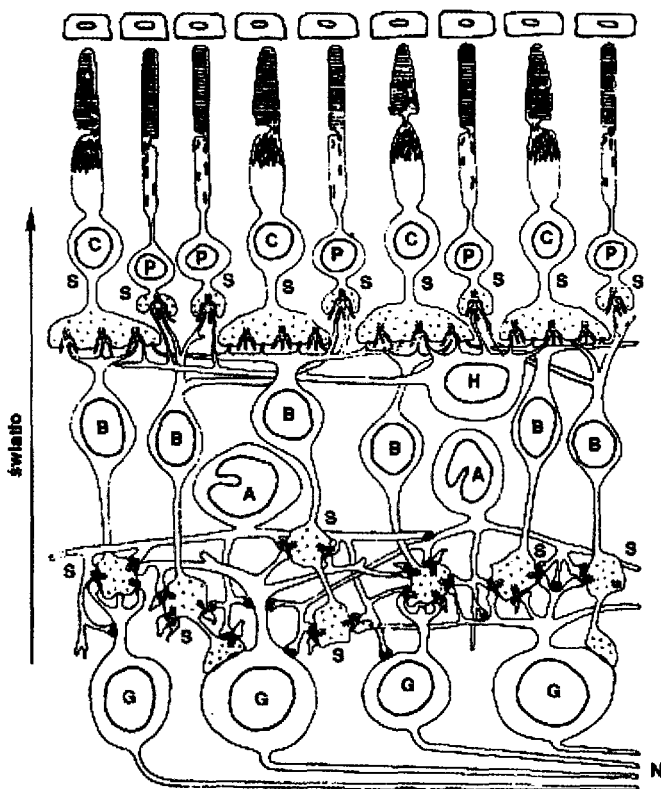
i odniesienie ich do kategorii, którymi operujemy potocznie opisując postrzeganie. Poniższy tekst stanowi próbę takiego wyjaśnienia i prezentuje zastosowaną metodę oceny zmian barwy, wypracowaną w toku badań materiałów używanych w restauracji malarstwa.

WRAŻENIE BARWY I KLASYFIKACJA BARW

Zjawisko barwnego widzenia jest następstwem odbijania światła w zakresie widzialnym przez dostatecznie oświetlony przedmiot. Wrażenie barwy wywołuje emitowane przez Słońce lub inne źródła promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie widzialnym, tj. od 397 do 687 nm (w uproszczeniu przyjmujemy 400–700 nm), czyli „światło”. Z odpowiednimi długościami fal elektromagnetycznych związane są określone barwy widmowe – od najkrótszych fal widzialnego zakresu: fiolet, niebieski, niebieski cyjanowy, zieleń, żółcień, czerwień, magenta. Światło odbite od przedmiotu, tj. ten zakres promieniowania świetlnego, który nie został pochłonięty, wpada do oka przez źrenicę – soczewkę skupiającą je na światłoczułej siatkówce na dnie oka. Siatkówka posiada dwa rodzaje receptorów: **pręciki** czule na natężenie oświetlenia, dostarczające informacji o jasności i ciemności oraz trzy rodzaje **czopków** czułych na światło czerwone, niebieskie i zielone, czyli na podstawowe barwy widma, co pozwala na odtworzenie barwy na drodze syntezy przez addycję.

Pręciki pracują niezależnie od oświetlenia, natomiast czopki uaktywniają się przy dostatecznym oświetleniu, stąd też inaczej widzimy przy pełnym dziennym oświetleniu (widzenie fotopowe) i inaczej o zmroku (widzenie skotopowe). Pręciki i czopki przetwarzają światło odbite od obiektu i wysyłają informację w postaci impulsu elektromagnetycznego do nerwu wzrokowego połączanego z mózgiem, który przetwarza je na barwne widzenie obiektu. Na postrzeganie i rozróżnianie barw wpływ ma wiele czynników. Postrzegana barwa zależy od sposobu, w jaki obiekt odbija i pochłania światło padające, od rodzaju, natężenia i sposobu padania tego światła. Rodzaj tła, na jakim obiekt się znajduje, i jego wielkość także wpływają na powstające wrażenie barwy. Wpływ barwy otoczenia na postrzeganą barwę przedmiotu ilustruje zjawisko kontrastu równoczesnego – jasności i barwności. Wreszcie cechy indywidualne obserwatorów oraz ogólnofizjologiczny stan organizmu także warunkują postrzeganie barwy. Przy dobrym oświetleniu i braku defektów wzroku człowiek może odróżnić ok. 10 mln barw, jednak nazwanie i określenie cech każdej z nich jest niemożliwe. Według Wrighta potrafimy rozróżnić 150 odcieni barw w widzialnym spektrum.

Barwa ma naturę, którą można określić jako „trójwymiarową” – tzw. trójkromatyczną i jej psychometrycznymi, wizualnymi parametrami są: **jasność** (ang. *lightness*, fr.: *clarté*, czasem *luminosité*), **odcień**, inaczej zwany ton (ang. *hue*, fr. *teinte*, *tonalité*) oraz **nasycenie**, czystość barwy lub chroma, zwana też



II. 1. Schemat budowy oka

P—pręciki, C—czopki, S—synapsy, G—gangliony,
A, B, H—komórki pośrednie, N—nerw wzrokowy

Na podstawie: J. Mielicki, *Zarys wiadomości o barwie*, Łódź 1997, s. 15, rys. 1.11

intensywnością (ang., fr. *saturation, chroma*). Zapewne z racji tego, że barwa jest wrażeniem subiektywnym, przytoczone terminy ją opisujące nie tylko w języku potocznym nie zawsze są używane w sposób ścisły i adekwatny, lecz także i w systematyzujących percepcję barwy opracowaniach określane są niejednako, co może prowadzić do nieporozumień. Poniżej podano je w najczęściej spotykanym w literaturze fachowej rozumieniu i w tej postaci stosowano je w całym tekście tego opracowania¹.

¹ Terminologia podawana przez różne źródła często nie pokrywa się precyzyjnie. Norma PN-90/E-01005 charakteryzuje i rozróżnia terminy: *jasność* i *jaskrawość*, *odcień*, *barwność*, *nasycenie* i *chroma*, które w praktycznym użyciu i w literaturze często stosowane są mniej precyzyjnie, zamiennie lub łącznie. A. Zausznica, *Nauka o barwie*, Warszawa 1959, s. 156, 362; R. S. Hunter, *The Measurement of Appearance*, New York 1975, s. 13, 60; P. Kowaliski, *Vision et mesure de la couleur*, Masson, Paris 1990, s. 48, 176, 243; J. Mielicki, *Zarys wiadomości o barwie*, Łódź 1997, s. 19-23.

Jasność (nazywana też natężeniem lub „czystością”, co może być mylące) może być inaczej nazwana walorem i określa, jak bardzo dana barwa zbliża się do bieli lub czerni, może być również opisana określeniami: jasna, ciemna.

Odcień informuje o tym, czy dana barwa jest np. żółta, niebieska, zielona czy czerwona itd.² Określa go długość fali elektromagnetycznej w zakresie od 400 do 700 nm. Odcienie stanowią ciągle zamknięte następstwo opisywane zwyczajowo zgodnie z kolejnością barw dopełniających, tj. od żółtego poprzez żółtawoorańczowy, oranzowy, czerwony, czerwonopurpurowy, purpurowy, purpurowoniebieski, fioletowy, niebieski itd. do zielonego i dalej do żółtego. Odcień czy ton jest podstawową cechą jakościową, dzięki której rozróżniamy części widma świetlnego. Wrażenia barwne, w których tę cechę obserwujemy, nazywa się barwami chromatycznymi, a pozbawione tej cechy – achromatycznymi, czyli biel, czern i szarości. Barwy achromatyczne różnią się tylko jasnością.

Nasylenie (nazywane czasem chroma) definiuje czystość danej barwy, jej stopień zabarwienia związany z zawartością barwy achromatycznej, o czym informują potoczne określenia, np. żywa, blada, „głucha”, brudna, szarawa (w przypadku barw widmowych nasycenie jest określane przez część białego promieniowania zawartą w promieniowaniu barwnym).

Barwny wygląd światła lub powierzchni jest przede wszystkim wynikiem ich odcienia i nasycenia i często te dwie cechy łącznie nazywane są **chromatycznością**. Termin ten odnosi się przede wszystkim do barw światła, czyli tzw. barw niezależnych. Chromatyczność od nasycenia różni się tym, że można ją porównywać bez względu na jasność barwy, natomiast nasycenie porównuje się w przypadku barw o jednakowej jasności.

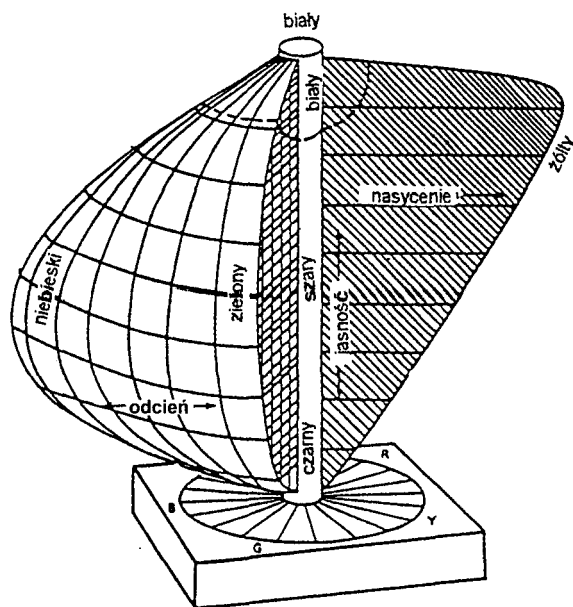
Każda z trzech wielkości charakteryzujących barwę, czyli odcień, nasycenie i jasność, może zmieniać się niezależnie. Jednocześnie poszczególne cechy barwy mogą wpływać na postrzeganie pozostałych. Barwy o dużej jasności, z wyjątkiem jaskrawych, uważamy za bardziej nasycone od tych o mniejszej jasności. Z kolei wzrost jasności barwy powoduje niewielką zmianę odcienia, nie przekraczającą różnicy wywołanej przez zmianę długości fali o ok. 30 nm (tzw. zjawisko Pezolda i Brueckego).

Dla materialnych barw, jakimi są pigmenty, ich odcień zależy od wyboru materiału barwnego, nasycenie (czystość) – od jego siły barwienia i ilości dodanej bieli (jako pigmentu lub bieli podkładu), jasność od własnej jasności pigmentu i od zawartości czerni w mieszaninie³. Dodanie do barwy chromatycznej barw achromatycznych przyniesie różne konsekwencje. Zmieszanie subtraktywne barwy chromatycznej z czernią lub szarością powoduje powstanie barwy tzw. trzeciorzędowej, np. brunatnej, granatowej, oliwkowej. W porównaniu z barwą chromatyczną sprzed zmieszania zmiana polega na spadku jasności, a także nasycenia. Dodatek bieli obniży nasycenie, podnosząc jednocześnie jasność.

² Wg normy PN – 90/E – 01005: odcień – właściwość wrażenia wzrokowego powodująca to, że barwa obserwowanej powierzchni wydaje się podobna do jednej z barw postrzeganych: czerwonej, żółtej, zielonej, albo kombinacji dwóch z nich.

³ P. Kowalski, op. cit., s. 152.

Powstało wiele systemów i metod służących zobiektywizowaniu wrażenia barwy i wyrażaniu jej różnic. Ściśle naukowe próby klasyfikacji zagadnień związanych z barwą podjęto w XVII wieku. Izaak Newton zaproponował uporządkowanie barw w kołowym diagramie, do którego odwoływali się także późniejsi badacze, lecz dwuwymiarowy układ pozwalał na przedstawienie jednocześnie tylko dwóch z trzech parametrów barwy.



II. 2. Schemat atlasu Munsella

Na podstawie: E. Kamińska-Tarnawska, Barwa, jej pomiar i systemy barw, (mps) IPTiF Gliwice 1990, il. 1

Prawdopodobnie najstarsze próby trójwymiarowej geometrycznej klasyfikacji barw są dziełem Forsiusa (1611), następnie P. O. Rungego (1810), E. Chevreula (1839), a kontynuowali je już w XX wieku kolejni uczeni⁴. Podwaliny stworzenia jednorodnej przestrzeni barw dał system Munsella, który w pierwszym zarysie powstał już w 1905 roku, w odróżnieniu od wcześniejszych systemów wciąż stosowany po kolejnych udoskonaleniach w miarę rozwoju wiedzy o barwach. Albert H. Munsell, malarz i nauczyciel malarstwa w szkole sztuk pięknych w Bostonie, z racji swej profesji zainteresował się systematycznym przedstawieniem percepcji barwy. Na potrzeby swojego nauczania sklasyfikował

⁴ A. Zausznica, op. cit., s. 332–361; P. Kowaliski, op. cit., s. 149–158.

barwy w logicznym porządku. Określił je w systemie kołowych współrzędnych zdefiniowanych przez trzy podane wyżej parametry; przestrzeń barw miała kształt walca. Walor określił w dziesięciostopniowej skali od 0 (czern) do 10 (biel), odcienie – pięć podstawowych i pięć pochodnych – umieścił na okręgu tak, by dwie barwy znajdujące się naprzeciw siebie były komplementarne. Nasylenie barw wzrastało także w dziesięciostopniowej skali od centrum ku granicy koła. System Munsella, stopniowo udoskonalany, oparty na statystycznych badaniach ok. 10 000 obserwatorów, pozwolił na stworzenie atlasu barw, stosowanego do dziś powszechnie w Stanach Zjednoczonych. Jako jedyny charakteryzuje się on jednorodnym rozmieszczeniem barw w przestrzeni.

W Europie nie przyjął się – głównie z przyczyn ekonomicznych, stosowany jest natomiast jego odpowiednik – atlas DIN 6164 (norma niemiecka), będący również systematyczną klasyfikacją barw postrzeganych, w tym przypadku w przestrzeni stożkowej, która bazuje także na parametrach odcienia, nasycenia i zamiast jasności – ściemnienia. Istnieją także inne systemy klasyfikacji oparte na wizualnej ocenie, np. skandynawski NSC – Natural Color System, niemiecki RAL i pozostałe, tworzone przez producentów barwników⁵. Korzystanie z atlasów i wzorników może być jednak dość kłopotliwe, m.in. ze względu na ograniczoną trwałość materiałów, z których są wykonane. Ocena barwy na podstawie wzorców może dać porównywalne i precyzyjne wyniki tylko przy rygorystycznym zachowaniu odpowiednich warunków oświetlenia i obserwacji. Poza tym istniejące atlasy nie obejmują pełnej palety barw chromatycznych uszeregowanych według cech zmieniających się w sposób ciągły i jednakowy oraz barw achromatycznych o bardzo dużej liczbie stopni jasności. W celu zobiektywizowania oceny barwy powstał cały szereg systemów opartych na instrumentalnym pomiarze. Prace w tej dziedzinie koordynowane są przez CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) i mają na celu odwzorowanie procesu ludzkiego postrzegania barwy.

BARWA WARSTWY MALARSKIEJ I INNE WŁAŚCIWOŚCI OPTYCZNE WPLYWAJĄCE NA JEJ POSTRZEGANIE

Wrażenie barwy warstwy malarskiej powstaje przez selektywne pochłanianie światła przez pigmenty i spoiwo w zakresie promieniowania widzialnego. Barwy, które może postrzegać obserwator, są rezultatem mieszania substraktywnego, co oznacza, że powstała barwa jest rezultatem sumowania długości fal pozostałych po absorpcji, czyli część widma nie pochłonięta przez składniki warstwy malarskiej po wyjściu z niej zostaje odbita w sposób rozproszony na powierzchni. Część światła wchodzącego do warstwy malarskiej ulega rozproszeniu na granicy pigment – żywica. Optyka warstw malarskich jest zagad-

⁵ J. Mielicki, op. cit., s. 63–68.

nieniem bardzo skomplikowanym z racji mnogości czynników wpływających na efekt końcowy postrzegany przez obserwatora. Zależy on od różnorodnych komponentów warstwy malarskiej, układów, w jakich występują – np. laserunkowych nawarstwień działających jak filtry barwne, możliwości oddziaływania podłoża⁶.

Warstwy malarskie i pigmenty z osobna można scharakteryzować przez ich krzywe odbicia widmowego (remisji) utworzone przez współczynniki odbicia $R(\lambda)$ dla poszczególnych długości fal promieniowania. Rozwinięto wiele teorii służących wyjaśnieniu zjawisk decydujących o wyglądzie warstwy malarskiej. Teoria Kubelki i Munka wykazuje zależności pomiędzy odbiciem widmowym a pochłanianiem zachodzącym w błonie i grubością błony. Teoria wielokrotnego odbicia przedstawia zależności między współczynnikiem rozpraszania i pochłaniania a stężeniem objętościowym pigmentu⁷ oraz tzw. przekrojem rozpraszania i przekrojem pochłaniania cząstki pigmentu. Teoria Mie łączy te ostatnie parametry z wielkością cząstki pigmentu, długością fali światła padającego i stałymi optycznymi materiału, tj. współczynnikiem załamania światła i współczynnikiem pochłaniania. Teorie te, pomocne przy przewidywaniu i tłumaczeniu efektów optycznych zachodzących w warstwie malarskiej, okazują się także przydatne przy diagnozowaniu typu obserwowanych zmian wyglądu warstw malarskich i ich interpretacji⁸. Podczas samej tylko ewaluacji zmian barwy ich znajomość nie jest jednak bezpośrednio wykorzystywana.

Krycie warstwy malarskiej, czyli jej zdolność do przesłaniania barwy podłoża, w największym stopniu zależy od objętościowego stężenia pigmentów, w mniejszym stopniu od wielkości cząstek i rodzaju spoiwa. Zmiana właściwości kryjących warstwy malarskiej powoduje jednocześnie zmianę odbieranej barwy – wpływa na zmiany nasycenia barwy, a także jej odcienia, zależnie od tego, jaką barwę ma podkład, czy będzie odbijał czy pochłaniał promieniowanie, w sposób selektywny czy całkowity. Spoiwo, nawet jeśli samo nie podlega zmianom barwnym, może pośrednio wpływać na zmiany barwy warstwy – skutek zmiany współczynnika załamania światła w procesie starzenia czy nawet tylko wysychania. Rozpraszanie światła przez dany pigment nie jest bowiem wartością stałą, lecz jest zależne od otoczenia, w którym się on znajduje. Różnorodne pod względem chemicznym spoiwa posiadają różne współczynniki załamania światła i w różnym stopniu wpływają na rozpraszanie światła przez pigment. Wiązka światła przechodząc ze spoiwa do pigmentu jest tym bardziej załamana, im większa jest różnica współczynników załamania

⁶ Ten aspekt mieszania barw w warstwie malarskiej z praktycznego punktu widzenia podjęła E. Basiul w ramach pracy kwalifikacyjnej I stopnia pod kier. prof. dr. J. Flika – E. Basiul, *Problemy barwy w retuszowaniu obrazów sztalugowych malowanych w technice wielowarstwowej*, UMK, Toruń 1996.

⁷ SOP – udział objętościowy pigmentu w suchej warstwie malarskiej wyrażony procentowo.

⁸ Szerzej potraktowano te zagadnienia w przygotowywanej do druku rozprawie pt. „Uzupełnienia ubytków warstwy malarskiej obrazów. Zmiany optyczne a stabilność stosowanych materiałów”.

światła obu ośrodków. Przy małej ilości pigmentu w warstwie, czyli kiedy stężenie objętościowe pigmentów jest mniejsze niż wartość krytyczna, po wyschnięciu błona jest porowata, cząstki pigmentu stykają się z powietrzem, które wypełnia pustki pomiędzy nimi. Różnica współczynników załamania światła pomiędzy cząstkami pigmentu jest większa niż różnica tych współczynników dla pigmentu i spoiwa, powoduje więc wzrost rozpraszania, a zatem też większe krycie, co jest wyraźnie widoczne np. w warstwach z farb lateksowych, popularnie nazywanych emulsyjnymi. W przypadku zmiany współczynnika załamania światła spoiwa w procesie starzenia, np. w warstwach olejnych, różnice współczynników załamania światła spoiwa i pigmentu maleją, maleje więc rozpraszanie i spada krycie warstwy.

Połysek warstwy malarskiej, czyli „kierunkowo selektywne właściwości odpowiedzialne za stopień, w jakim odbite refleksy lub obraz obiektu mogą być widoczne jako nałożone na powierzchnię” także ma w praktyce wpływ na odbiór jej barwy⁹.

Zjawiska zachodzące na powierzchni warstwy malarskiej bądź werniksu warunkują ich połysek. Największe praktyczne znaczenie ma połysek lustrzany (in. regularny) i tzw. wyrazistość obrazu, choć oko ludzkie rozróżnia także dodatkowe zjawiska związane z połyskiem. Połysek związany jest z odbiciem regularnym, zwanym też kierunkowym czy lustrzanym. Zachodzi ono, gdy powierzchnia jest idealnie gładka. Kiedy jest faliście nierówna, światło nadal odbija się regularnie, lecz z powodu tychże nierówności odbite promienie mają różne kierunki. Jeżeli nieregularności są bardzo małe, o wymiarach zbliżonych do długości fal światła w zakresie widzialnym, światło odbija się we wszystkich kierunkach, czyli w sposób rozproszony.

Warstwy malarskie i warstwy werniksów wykazują jednocześnie odbicie regularne i rozproszone. Jeżeli ilość światła odbitego regularnie przeważa nad ilością światła odbitego w sposób rozproszony, powierzchnia będzie błyszcząca. Każda nieregularność powierzchni warstwy malarskiej czy to w postaci rowków pozostałych po przejściu pędzla – tzw. sznarów, zmarszczeń, „pomarańczowej skórki”, czy w postaci nierówności mniejszej skali zwiększa udział odbicia rozproszonego, więc osłabia połysek powierzchni. Wrażenie połysku zależy od kąta obserwacji i rodzaju oświetlenia. Oświetlenie punktowe powoduje większe wrażenie połysku niż oświetlenie rozproszone i dlatego to drugie jest wykorzystywane przy ekspozycji dzieł sztuki, zwłaszcza dzieł malarskich.

Współczynnik załamania światła błony również wpływa na intensywność połysku. Im mniejsza jest jego wartość, tym mniejsza ilość promieniowania z padającej wiązki zostanie odbita¹⁰. Niższa wartość współczynnika załamania światła błony jest po części odpowiedzialna za to, że werniksy złożone z żywic

⁹ Definicja za *Paint testing manual, Physical and chemical examination of paints, varnish, lacquers and colors*, Gardner-Sward 13th edition, 1972, The American Society for Testing and Materials, s. 15.

¹⁰ Zgodnie z wzorem w przypadku prostopadle padającej wiązki frakcję odbitą, wyrażoną przez współczynnik r_o opisuje zależność: $r_o = (n-1)^2/(n+1)^2$.

wielkocząsteczkowych (np. polimerów akrylowych) są mniej błyszczące od zawierających żywice niskocząsteczkowe (damarowe czy ketonowe). Warstwa pierwotnie błyszcząca traci połysk, jeśli współczynnik załamania światła przy jej powierzchni ulegnie zmniejszeniu lub osiadzie na niej cienki nalot substancji o niższym współczynniku załamania światła, co jest powszechnie obserwowane w przypadku degradacji lub zabrudzenia powierzchni.

Zagadnienia związane z barwą warstwy malarskiej są warunkowane głównie przez zjawiska zachodzące wewnątrz warstwy malarskiej, jednak połysk, choć zależny od odbicia na powierzchni, także ma wpływ na barwę i odwrotnie, barwa wywiera wpływ na wrażenie połysku odbierane przez człowieka. Wpływ połysku na barwę jest odwrotnie proporcjonalny do jasności powierzchni, czyli jej współczynnika odbicia rozproszonego¹¹. Przykładowo tak samo gładkie, czyli posiadające ten sam współczynnik odbicia regularnego i ten sam współczynnik załamania światła, powierzchnie białe wydają się mniej błyszczące od czarnych. Mała zniana połysku powierzchni wykazującej małą remisję, inaczej mówiąc ciemnej, ma zauważalny wpływ na wizualny odbiór barwy tej powierzchni. Z kolei spośród dwóch powierzchni o tej samej barwie ta, która ma wyższy połysk, wydaje się ciemniejsza i odwrotnie: powierzchnia wykazująca duże odbicie rozproszone, np. zmatowiała, nierówna, sprawia wrażenie jaśniejszej. W przypadku oświetlonych światłem rozproszonym warstw malarskich pokrytych werniksami należy brać pod uwagę oprócz odbicia światła na powierzchni także odbicie światła na granicy obu warstw. To pierwsze jednak w przypadku warstw spotykanych w konserwacji malarstwa procentowo dominuje, więc silniej wpływa na doznawane wrażenia wzrokowe, powodując osłabienie nasycenia barwy przez jej „rozjaśnienie”¹².

POMIAR I WYZNACZANIE RÓŻNIC BARWY

Barwa jako niepowtarzalne, indywidualne doświadczenie człowieka nie może w zasadzie być mierzona. Zmierzyć można właściwości przepuszczająco-odbijające materiału, czyli ilość światła o określonej charakterystyce widmowej (długości fali), jaka jest odbijana lub przepuszczana przez materiał w standardowych warunkach. Dążenie do obiektywnego pomiaru tych właściwości niesie z sobą konieczność posługiwania się standardowym iluminantem (źródłem światła), standardowym obserwatorem przy jednoczesnym możliwie dokładnym przetworzeniu procesu psychofizycznego na mierzalne instrumentalnie zjawisko

¹¹ P. M. Morse, *Surface Appearance*, [w:] *Pigment Handbook*, t. 3, red. T. C. Patton, New York 1973, s. 343.

¹² S. R. Jones, *A note on the transfer of light into and out of paintings*, *Studies in Conservation*, 38, No. 3, 1993, s. 177–178; J. Ciabach, *Badania dotyczące starzenia i stabilizacji współczesnych werniksów malarskich*, UMK, Toruń 1994, s. 66, 67. Autor oprócz rezultatów badań Jonesa cytuje innych badaczy i ich opinie na temat wpływu różnic współczynników załamania światła werniksów i spoiw warstw malarskich na percepcję tych warstw.

fizyczne. Historia teorii barwy to nieustające dążenie do korelacji między percepcją człowieka i przyrządów pomiarowych, do tej pory nie w pełni osiągniętej.

Instrumentalne określenie barwy polega na pomiarze własności odbijająco-przepuszczających materiałów i przekształceniu otrzymanych wyników w tzw. dane barwometryczne (kolorymetryczne), zazwyczaj trzy, które bezpośrednio wiążą wrażenie barwy standardowego obserwatora w danym oświetleniu. Standardowy, średni obserwator i standardowe źródła światła są wprowadzane przez CIE na podstawie uśrednienia sposobu widzenia zbioru obserwatorów i doboru jakości promieniowania źródeł światła do charakterystyki widmowej, np. światła żarówki wolframowej (A), średniego światła dziennego (D_{65}), światła słonecznego w południe (B) itp.

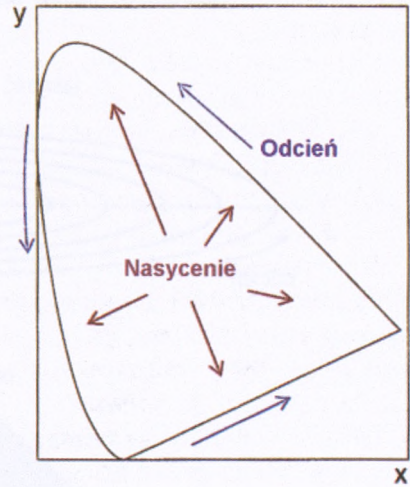
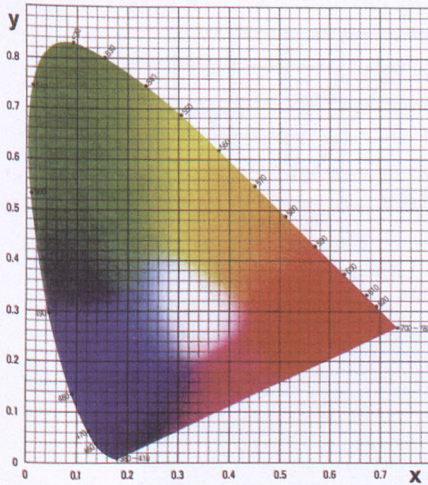
Pomiar barwy odbywa się poprzez oświetlenie próbki znanym źródłem światła i pomiar ilości światła odbitego przez światłoczułe diody lub siatki dyfrakcyjne. Informacje są przetwarzane przez odpowiedni program komputerowy oceniający względne ilości światła odbijanego lub pochłanianego w zależności od długości fali w zakresie widzialnym i przyporządkowujący danym pomiarowym określone krzywe odbicia. Zastosowanie samych krzywych jest jednak ograniczone, choć są one bardzo użyteczne przy przewidywaniu metameryzmu różnych zestawianych ze sobą substancji barwiących (pigmentów, barwników). Mogą okazać się też przydatne przy wstępnym rozróżnieniu rodzaju zmian w warstwie malarskiej, jak już wspomniano wcześniej.

Instrumentalne dane pomiarowe można przekształcić w dane barwometryczne. Składowe trójchromatyczne X – czerwień, Y – zieleń, Z – błękit jednoznacznie reprezentują barwę obiektu mierzoną w zdefiniowanych warunkach. Stanowią one określone odpowiednimi funkcjami matematycznymi tzw. bodźce barwowe odniesienia w układzie CIE 1931 (XYZ) normalnym¹³, gdzie współrzędnymi są odpowiednio x , y , z :

$$x = \frac{X}{(X+Y+Z)}, \quad y = \frac{Y}{(X+Y+Z)}, \quad z = \frac{Z}{(X+Y+Z)},$$

Układ ten, tak jak i inne systemy, oparty jest na założeniu istnienia trzech niezależnych barw, w przypadku omawianego układu teoretycznych filtrów CIE, których mieszanie – nakładanie pozwala uzyskać dowolną barwę, a mieszanie ich przy pełnej jasności daje biel (mieszanie addytywne). Układ XYZ jest podstawą każdego systemu barwy opartego na danych pomiarowych. Związana z nim jest przestrzeń barw CIELAB, obecnie najpowszechniej

¹³ Poprzednikiem był układ RGB, utworzono także układ CIE 1964 (X_{10} Y_{10} Z_{10}) dodatkowy normalny. PN-90/E-01005, ASTM E308-90 Standard Test Method for Computing the Colors of Objects by Using the CIE System.



II. 3. Układ CIE 1931

Na podstawie: *Analyse des couleurs, parlons clair*, Minolta 1994, s. 17, il. 7

stosowana jako najbardziej zgodna z wizualną percepcją (z 1971 z uzupełnieniem z 1975 r., zatwierdzona w 1976 r. jako obowiązująca)¹⁴. Przestrzeń barw w tym układzie jest trójwymiarowa, w przybliżeniu równomierna¹⁵, budują ją trzy współrzędne L^* – jasność oraz określające chromatyczność: a^* – czerwono-zieloność, b^* – żółto-niebieskawość. Każda barwa określona jest przez punkt o tych współrzędnych $L^*a^*b^*$ opisanych odpowiednimi równaniami na podstawie bodźców barwowych odniesienia X, Y, Z ¹⁶.

Odległości między punktami, tzn. różnice między dwiema barwami (ΔE^*_{ab}) można wyrazić pierwiastkiem sumy kwadratów różnic $\Delta L^*, \Delta a^*, \Delta b^*$.

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

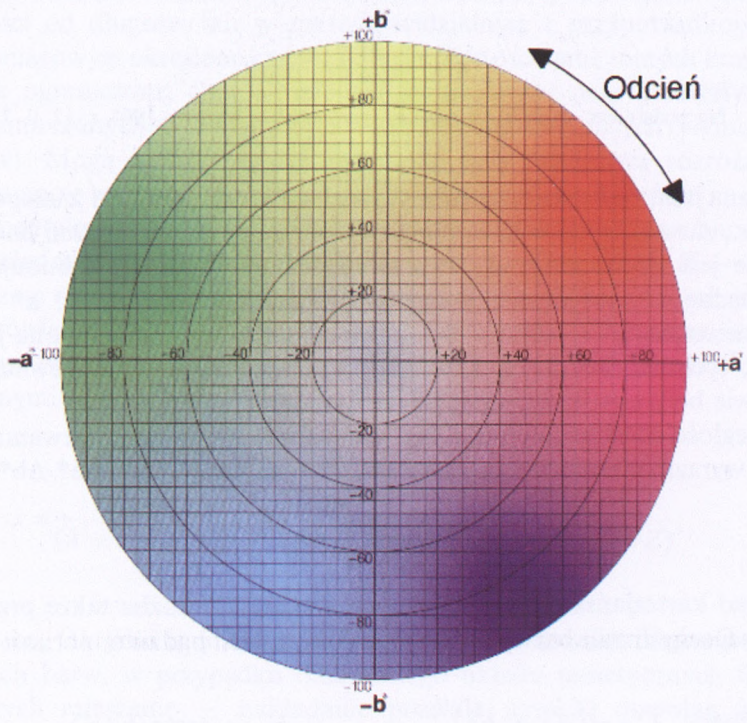
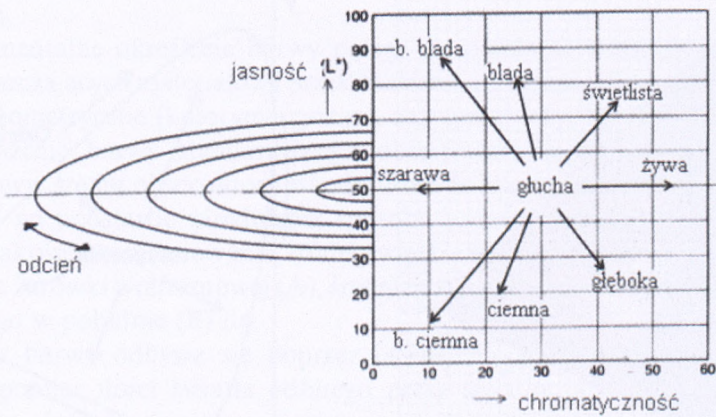
Układ kartezjańskich współrzędnych L^*, a^*, b^* można także przedstawić w postaci współrzędnych cylindrycznych L^*, C^*, h^* , gdzie:

$$C^*_{ab} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad h^*_{ab} = \arctg(b^*/a^*)$$

¹⁴ Stosowane są także inne: przestrzeń barw Hunter Lab – głównie w przemyśle farb w USA, układ CIE LUV – używany przy określaniu barw na ekranach monitorów.

¹⁵ PN-90/E-01005, 845-03-51.

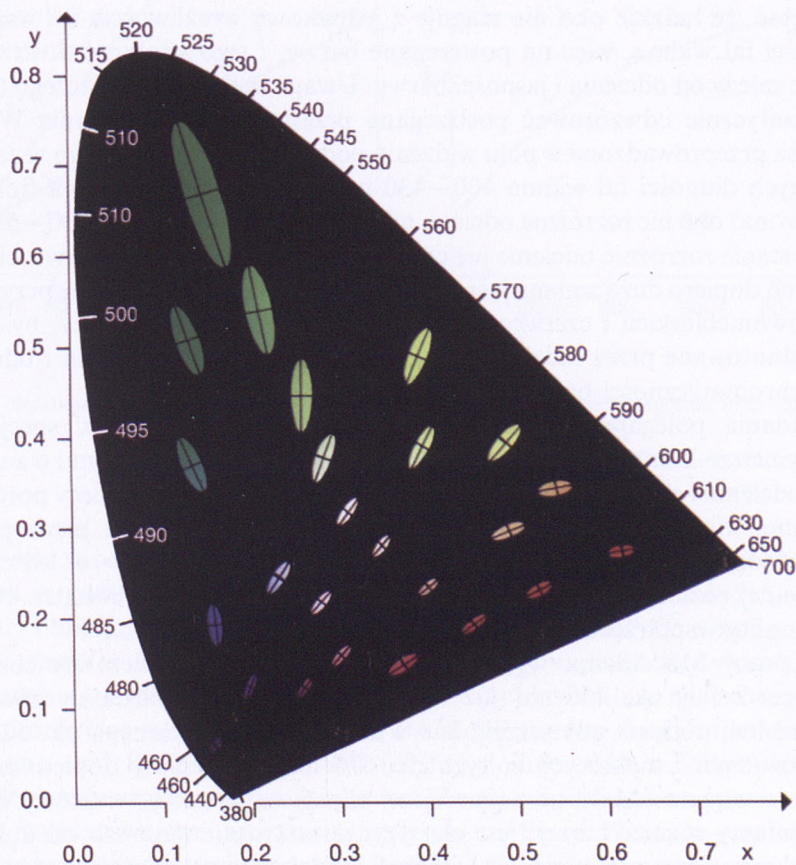
¹⁶ PN-90/E-01005, 845-03-56.



II. 4. Przestrzeń barw $L^*a^*b^*$ – schemat jasności i chromatyczności oraz schemat chromatyczności a^*b^*

Na podstawie: *Analyse...*, s. 18, il. 7, 8

Można na ich podstawie wyznaczyć różnice nasycenia (ΔC_{ab}^*) czy odcienia (ΔH_{ab}^*). Układ $L^*C^*h^*$ bardziej przypomina układ Munsella.



II. 5. Elipsy MacAdama (dziesięciokrotnie powiększone)

Na podstawie: *Instrumental Color Control*, Datacolor seminar papers, 1998, B.02.0

Różnica barwy ΔE (od *Empfindung* – odczucie, wrażenie) oznaczona obiektywnie nie oddaje jednak ściśle różnic ocenianych wizualnie. Jest tak dlatego, gdyż trójwymiarowa przestrzeń barw nie jest idealnie zgodna z postrzeganą przestrzenią jasności, odcienia i nasycenia, tzn. równe odległości w przestrzeni wizualnej nie są równymi odległościami w trójchromatycznej przestrzeni barw opartej na pomiarach. Instrumentalne odwzorowanie procesu

ludzkiego postrzegania barwy jest jeszcze niedoskonałe, dotychczas opracowane matematyczne wzory do obliczania różnic barwy nie uwzględniają pełnej fizjologii widzenia barwy. Być może nie jest możliwe całkowicie obiektywne zrealizowanie tego celu, lecz prowadzone są prace, które najprawdopodobniej udoskonalą instrumentalne charakteryzowanie barw i ich różnic¹⁷.

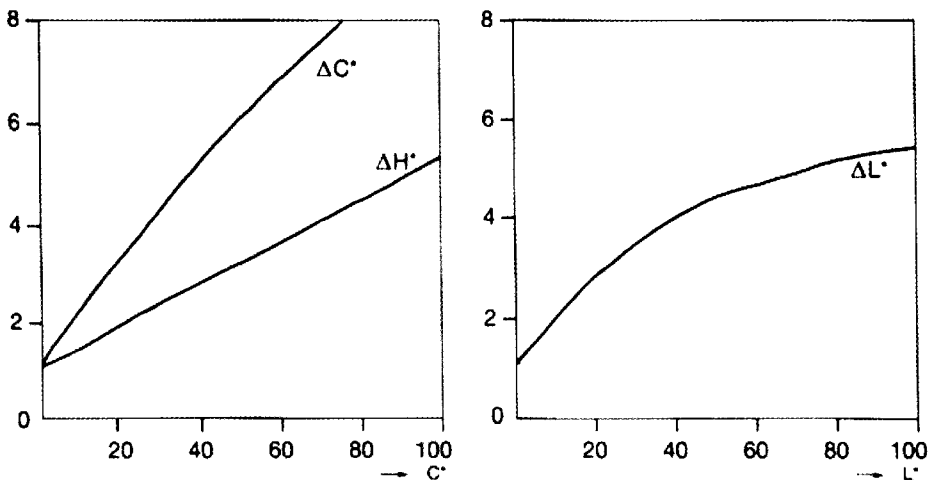
Porównując wyniki instrumentalnych pomiarów z oceną wzrokową należy pamiętać, że ludzkie oko nie reaguje z jednakową wrażliwością na wszystkie długości fal widma, więc na postrzegane barwy, i jego zdolność dostrzeżenia różnic zależy od odcienia i jasności barwy. Uwaga ta tłumaczy, dlaczego trudno matematycznie odwzorować postrzeganą przestrzeń barw. Badania Wrighta i Stilesa przeprowadzone w polu widzenia pod kątem 2° wykazały, że w zakresie skrajnych długości fal widma 400–430 nm i 650–700 nm (barwa fioletowa i czerwona) oko nie rozróżnia odcieni, natomiast dla fal o długości 430–650 nm jest w stanie rozróżnić odcienie już co 1–3,2 nm. W przypadku barw zielonych i żółtych dopiero duża zmiana jasności jest dostrzegana wzrokowo, w przypadku fioletowoniebieskich i czerwonych wystarczą niewielkie jej zmiany, by mogły być odnotowane przez ludzkie oko. Postrzeganie różnic nasycenia i odcienia, czyli chromatyczności barw, badał MacAdam.

Badania polegały na porównywaniu przez obserwatora w specjalnym kolorymetrze-komparatorze 25 różnych barw zestawianych z innymi o zmieniających odcieniu i nasyceniu. W wyniku ponad dwudziestu pięciu tysięcy porównań ustalono, kiedy daje się zauważyć różnice¹⁸. Okazało się, że przez punkty odpowiadające współrzędnym trójchromatycznym x , y barw o ledwie dostrzegalnej różnicy można poprowadzić eliptyczne krzywe, wewnątrz których leżą punkty współrzędnych barwy, z jaką porównujemy.

Z pracy MacAdama wynika, że w zakresie barw fioletowoniebieskich o długości fali ok. 450 nm już bardzo małe zmiany chromatyczności są zauważalne, podczas gdy szczególnie w zakresie barw zielonych ok. 525 nm, zielonożółtych i niektórych żółtych ok. 570 nm zauważamy dopiero zmiany znacznie większe. Mała oś najmniejszej elipsy, czyli strefy, w której dobrze rozróżniamy różnice barwy, jest ok. trzydziestokrotnie mniejsza od dużej osi największej elipsy, czyli strefy, w której oko ludzkie gorzej dostrzega różnice, co oznacza większą tolerancję dla zmian. Ponadto dla barw bardzo nasyconych, czystszych, bliskich barwom widmowym gorzej postrzegamy różnice, podobnie dla barw bardzo jasnych.

¹⁷ J. Mielicki, op. cit., s. 227. Dąży się do połączenia logiki zbiorów rozmytych, które stanowią zbiory działających na oko bodźców powodujących wrażenie barw, modeli przetwarzania informacji opartych na sieciach neuronowych i cyfrowego opisu zbiorów.

¹⁸ Praca została opublikowana w „Journal of Optics Society of America” 1942, 321, s. 247–274. Przy większej liczbie obserwatorów kształty elips mogą się różnić, lecz uśrednione pokrywają się zasadniczo z kształtem elips MacAdama.



II. 6. Tolerancja zmian nasycenia (ΔC^*) i odcienia (ΔH^*) zależnie od nasycenia oraz tolerancja zmian jasności (ΔL^*) zależnie od jasności

Na podstawie: *Instrumental...*, B.03.0

W celu skoordynowania z wizualną oceną wartości różnic barwy otrzymywanych metodą instrumentalnych pomiarów wprowadzono zmodyfikowane formuły obliczania różnic barwy (ΔE^*), m.in. JPC (od J&P Coates) i popularniejszy rezultat jego ewolucji CMC (l:c) przyjęty przez brytyjski Colour Measurement Committee (in. ΔE_{CMC}), BFD (l:c) stworzony na uniwersytecie w Bradford, jego wariant BFDA (l:c), BAM (od Bundes Anstalt für Materialforschung und Prüfung) CIE 1994 (ΔE^*_{94}), i inne, będące kolejnymi udoskonaleniami uwzględniającymi różną wrażliwość ludzkiego oka na poszczególne barwy, wypracowanymi przez różne instytuty czy firmy. Wzory te stosowane są głównie przy standaryzacji wyrobów i zgodnie z przyjętymi normami mogą być użyte w przypadku małych wartości różnic CIELAB¹⁹. Statystyczne badania wykazują, że wyniki uzyskiwane w poszczególnych, wymienionych wyżej wzorach będących udoskonaleniem wzoru CIELAB niewiele różnią się między sobą, przy czym w zależności od danych eksperymentalnych wielkość różnicy może się zmieniać.

Wyliczone na podstawie pomiarów instrumentalnych różnice barwy czy poszczególnych jej parametrów są wykorzystywane nie tylko przy tzw. kontroli jakości, czyli standaryzacji cech wyrobu (farby, barwnika etc.), lecz także przy

¹⁹ K. Witt, *CIE Guideline for Coordinated Future Work on industrial Colour Difference Evaluation*, Color Research and Application 1995, vol. 20, No. 6, s. 399–403. Autor wskazuje na wartości dla ΔE^*_{ab} od 0 do 5, jeśli stosujemy wzór ΔE^*_{94} . Wzór CMC nie nadaje się dla wartości ΔE^*_{ab} powyżej 10.

ocenie trwałości barwy, m.in. odporności na działanie światła. Jako takie mogą być i są wykorzystywane do oceny trwałości materiałów artystycznych oraz przeznaczonych do konserwacji dzieł sztuki, gdzie kryteria stabilności optycznej są szczególnie rygorystyczne.

STOSOWANE METODY OCENY ZMIAN BARWY MATERIAŁÓW

OCENA WIZUALNA

Podstawę oceny zmian barwy stanowi wizualna obserwacja. W celu jak największego zobiektywizowania sposób jej wykonania określają odpowiednie normy. Prawidłową wizualną ocenę różnic wykonuje się w znormalizowanych warunkach za pomocą pięcio- lub dziewięciostopniowej szarej skali (norma ISO-105-A02)²⁰, której poszczególne stopnie-kontrasty określają stopnie trwałości i odpowiadające im różnice barw. Określając wizualnie różnice barwy przy ocenie trwałości dodatkowo porównuje się zmiany barwy badanych próbek ze starzonymi w identycznych warunkach wzorcami o znanej odporności w 8-stopniowej skali niebieskiej (ISO 105) stworzonymi do badania odporności barw w przemyśle tekstylnym, lecz znajdującymi zastosowanie także poza nim. Barwa niebieska została wybrana do wybarwienia wzorców jako ta, której zmiana jest najłatwiej zauważalna wzrokowo – zgodnie z prawidłowością stwierdzoną przez MacAdama.

Niestety, w badaniach międzylaboratoryjnych przeprowadzonych z inicjatywy grupy barwometrycznej przy komitecie ISO stwierdzono niewystarczającą zgodność ocen wykonanych przy użyciu skali szarej przez doświadczonych obserwatorów, niższą niż uzyskiwana na drodze pomiarów instrumentalnych²¹. Tylko 68% ocen mieściło się w granicach dopuszczalnego błędu. Błąd, czyli średnie standardowe odchylenie, wynosił 0,55 stopnia skali szarej, a u niektórych obserwatorów średnia ich ocen różniła się od średniej wartości aż o 1 stopień. Wizualna klasyfikacja stopnia zmian wzorców niebieskich może być obciążona jeszcze większym błędem, ponieważ zmiany w obrębie poszczególnych wzorców następujące z upływem czasu są coraz mniej zauważalne, więc trudno je precyzyjnie określić.

Ocenianie różnic barwy wg stopni skali szarej jest powszechnie stosowane, mimo że może być w istotnej mierze niedokładne. Stosuje się je głównie z tego powodu, że jest to metoda wygodna i niewymagająca posiadania aparatury pomiarowej. Opracowano, najprawdopodobniej ze względu na popularność oceniania według tej skali, zaakceptowane przez ISO formuły umożliwiające obliczanie stopnia trwałości wybarwień na podstawie instrumentalnej oceny

²⁰ Warunki oceny charakteryzuje PN-ISO 105-02, zastępująca starą normę PN-86/P-04906.

²¹ J. Mielicki, op. cit., s. 257; K. Krysiak, *Współczesne problemy pomiarów barwy*, I Krajowe Sympozjum Kolorymetryczne, Łódź 1996, s. 119; idem, *Instrumentalna ocena zabrudzenia bieli*, II Krajowe Sympozjum Kolorymetryczne, Łódź 1997, s. 101 – 104.

różnicy barwy, czyli przeliczanie liczbowych danych ΔE^* lub ΔE^*_{CMC} na stopnie skali szarej (np. najwyższy stopień trwałości 5 odpowiada $\Delta E^* = 0 + 0,2$, 4–5: $\Delta E^* = 0,8 + -0,2$ itd.)²².

OCENA OPARTA NA POMIARACH INSTRUMENTALNYCH

Ocena instrumentalna jest więc przynajmniej z kilku względów mniej zawodna od konwencjonalnej wzrokowej. Instrumentalny pomiar barwy pozwala oprócz wyżej opisanej zwykłej oceny różnic barwy także na ocenę metameryzmu, czyli określenie różnicy barwy dwu powierzchni ujawniającej się przy zmianie oświetlenia. Metameryczne barwy charakteryzowane są przez te same składowe trójchromatyczne (X, Y, Z), lecz mają różny skład widmowy i ich krzywe odbicia przecinają się przynajmniej w trzech punktach, zazwyczaj w zakresie częstotliwości 430–480 nm, 500–580 nm i 550–640 nm. Wynikająca z dokonania instrumentalnych pomiarów barwy możliwość porównania barwnych powierzchni nieróżniących się od siebie w świetle dziennym, a wykazujących różnice w oświetleniu o innym rozkładzie widmowym (np. iluminantami A – światło ciepłe żarówki wolframowej, F₁, F₂, F₃ – światło fluorescencyjne, tj. świetlówki), czyli wyznaczenie szczegółowego wskaźnika metameryzmu MI (Metameric Index), jak i porównanie krzywych odbicia tych powierzchni okazują się przydatne także przy doborze pigmentów do wykonywania uzupełnień warstwy malarskiej w dziełach sztuki.

TECHNIKI POMIAROWE

Pomiar barwy, a ściślej współczynników przepuszczania (transmisji) lub odbicia (remisji) może się odbywać za pomocą urządzeń dwu typów: trójbódcowych filtrowych kolorymetrów czy fotokolorymetrów lub spektrokolorymetrów (spektrofotometrów). Oba typy przyrządów dokonują pomiarów porównawczych, gdzie przy użyciu detektorów określa się stosunek strumienia promieniowania przepuszczonego przez dane ciało (przezroczyste) lub odbitego od niego do strumienia przepuszczonego lub odbitego od substancji wzorcowej. W przypadku pomiaru współczynników odbicia jest nią powierzchnia pokryta substancją jak najbardziej zbliżoną do idealnej bieli (rozpraszacza doskonałego).

W metodzie trójbódcowej trzy detektory są wyposażone w filtry składowych trójchromatycznych tak, by ich czułość widmowa miała charakter funkcji kolorymetrycznych i odpowiadała czułości oka ludzkiego, po czym są obliczane wartości X, Y, Z i przetwarzane w odpowiednich przestrzeniach barw (np. CIELAB). Kolorymetry trójbódcowe znajdują zastosowanie przede wszystkim na liniach produkcyjnych do kontroli odchyień barwy wyrobów.

²² J. Mielicki, op. cit., s. 257–262.

W spektrofotometrach (spektrokolorymetrach) detektory są liczne, mierzą natężenie widmowych wiązek światła (przepuszczonego lub odbitego) dla wąskich pasm fal całego widma zakresu widzialnego (co 5, 10 lub 20 nm), mikroprocesor aparatu oblicza składowe trójkromatyczne przetwarzane potem w odpowiednich przestrzeniach barw, zarazem otrzymujemy współczynniki odbicia (remisji) lub przepuszczania (transmisji) w całym zakresie widma (400–700 nm), czyli krzywą odbicia (lub transmisji) mierzonej próbki. Spektrofotometry charakteryzuje więc wysoka precyzja i możliwość absolutnych pomiarów barwy, jakiej nie zapewniają aparaty trójbodźcowe, czyli kolorymetry lub fotokolorymetry.

W zależności od charakteru powierzchni, której współczynnik odbicia mierzymy, stosuje się odpowiednią geometrię pomiarową, jedynie powierzchnie całkiem matowe bez faktury pozwalają na uzyskanie podobnych wyników niezależnie od układu. Barwę powierzchni gładkich i bardzo błyszczących (np. lakiery samochodowe, materiały poligraficzne) mierzy się w geometrii 45/0, tj. oświetlając próbkę pod kątem 45° i mierząc promieniowanie odbite od niej prostopadle. Wyklucza to pomiar promieniowania odbitego lustrzanie, podobnie jak nie widzi się go w tych samych warunkach obserwacji. Powierzchnie o wyraźnej strukturze, nierówne, niejednorodnie błyszczące (np. wyroby włókiennicze, papier, drewno) lepiej mierzyć w układzie kołowym 45/0 (czyli przy oświetlaniu pod tym kątem ze wszystkich stron) lub w geometrii d/8°. Zastosowanie geometrii d/8° polega na oświetleniu próbki światłem rozproszonym i obserwowaniu światła odbitego pod kątem 8° do normalnej, przy czym umieszczenie pod tym samym kątem z drugiej strony pułapki lustrzanego odbicia pozwala na pomiar z włączeniem lub wyłączeniem połysku. W przypadku powierzchni fakturalnych błyszczących, np. błyszczących wyrobów włókienniczych, w celu wyeliminowania wpływu połysku na pomiar oświetla się próbkę światłem rozproszonym, a mierzy promieniowanie odbite od niej pod kątem prostym, stosując aparaturę o geometrii d/0.

ZASTOSOWANIE OCENY ZMIAN BARWY W BADANIACH MATERIAŁÓW STOSOWANYCH W KONSERWACJI MALARSTWA

Oceny zmian barwy dokonywano w ramach badań odporności na działanie światła materiałów stosowanych w konserwacji i restauracji dzieł sztuki — spoiw, werniksów, farb, mieszanin pigmentów ze spoiwami, innych substancji — oraz materiałów stosowanych w tradycyjnych technikach malarskich²³. Materiały te

²³ Metodę badań zmian barwy opracowano na potrzeby badań materiałów malarskich do uzupełnień ubytków w ramach własnej pracy doktorskiej (Zmiany optyczne retuszy w malarstwie sztalugowym, UMK, Toruń 2001, mps, promotor prof. dr J. Flik), wykorzystano później w węższym zakresie w szeregu prac prowadzonych w Zakładzie Konserwacji Malarstwa i Rzeźby Polichromowanej w ramach prac magisterskich i innych prac badawczych, a także realizowanych w innych zakładach Instytutu Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa.

w postaci błon, warstw malarskich, płytek z żywic barwionych w masie poddawane były procesowi przyspieszonego starzenia pod wpływem światła²⁴. Oceniono zmiany barwy zachodzące w próbkach pod wpływem starzenia. Obserwowane w trakcie działań konserwatorskich czy restauratorskich zmiany barwy warstw malarskich mogą następować jednak nie tylko pod wpływem procesów starzeniowych. Powodować je może również przesylenie spoiwem (np. konsolidującym), środkami dezynfekującymi czy naniesienie warstwy izolacyjnej (werniksu). Również takie przypadki poddane zostały analizie²⁵.

W pierwszym etapie dokonywano wizualnej ewaluacji zmian już w trakcie i po zakończeniu procesu sztucznego starzenia lub po naniesieniu wyżej wymienionych środków mogących wpływać na odbiór barwy. Ocenę przeprowadzano opierając się na normie PN-ISO 105-A02²⁶. Oceniano zmiany względem *skali szarej do oceny zmian barwy* oraz, w przypadku zmian powstałych wskutek starzenia, porównywano zmiany badanych próbek ze zmianami 8 niebieskich wzorców (ISO 105) starzonych wraz z nimi, metodą B proponowaną w normie BN-76/6110-35²⁷.

Posługiwano się dziewięciostopniową skalą szarą (tj. zawierającą stopnie pośrednie np. 2–3, 4–5). Stopień najwyższy 5 oznacza brak zmian, 4–5 oznacza zmianę słabo zauważalną – pomijalną, 4–3 – zmianę (różnicę) nieznaczną – itd. Im niższy stopień, tym większa zmiana, kontrast wzrasta w postępie geometrycznym. Do oceniania zmian białych próbek użyto pięciostopniowej *skali szarej do określania stopnia zabrudzenia bieli*. Dodatkowo porównywano dane kontrasty skali szarej wyznaczone dla próbek ze wzorcami skali niebieskiej, które starzone równolegle z próbkami osiągnęły ten sam stopień zmian określany kontrastem skali szarej, co analizowane próbki. W przeprowadzonych badaniach serii warstw malarskich nieznaczna zmiana próbek do stopnia 4–5 skali szarej odpowiadała stanowi wzorca niebieskiego nr 8 lub między 8 a 7, zmiana w stopniu 4 – zmianie wzorca nr 7, w stopniu 2–3 – zmianie wzorca 6. Ocenę wg szarej skali dokonano kilkakrotnie, po dłuższym odstępie czasu w celu zminimalizowania błędu, porównując także między sobą próbki, które uzyskały tę samą ocenę²⁸.

²⁴ Xenotest Alpha HE w Zakładzie Konserwacji Malarstwa i Rzeźby Polichromowanej (od r. 2000), Xenotest Heareus 150S w Instytucie Barwników Politechniki Łódzkiej i Instituut Collectie Nederland w Amsterdamie.

²⁵ Przykłady analizy zmian powodowanych werniksowaniem zaprezentowano w publikacjach E. Szmít-Naud: w niniejszym zeszycie AUNC, *Uzupełnienia ubytków warstwy malarskiej obrazów – badania materiałów stosowanych współcześnie*, s. 65–102, oraz w rozprawie doktorskiej: *Analiza zmian powodowanych przez nanoszenie roztworów środków dezynfekujących brak dezynfekcji promieniowaniem UVC – w badaniach dotyczących zastosowania fungicydów w malarstwie ściennym*, promotor prof. dr hab. A. Strzelczyk (przyp. 29).

²⁶ Polska norma, Tekstylija, Badanie odporności wybarwień, szara skala do oceny zmian barwy. Norma ta zastępuje starszą PN-86/P-04906.

²⁷ Norma branżowa: Określanie odporności powłok lakierowych na działanie światła wewnętrznego (ksenonowego).

²⁸ Przykłady oceny próbek badanych warstw malarskich wg skali szarej w aneksie VII. A cytowanej rozprawy doktorskiej (przyp. 29).

Stosowanie wizualnej metody oceny, choć stanowiące właściwy punkt odniesienia, może być, jak stwierdzono w praktyce, obarczone dużym błędem, szczególnie jeśli wykonuje ją osoba niedoświadczona. Instrumentalna ocena barwy i jej różnic, mimo niedoskonałości, powinna być uzupełnieniem i kontrolą prawidłowości oceny wizualnej. Jak nadmieniono wcześniej, to, jak postrzegamy daną barwę czy różnice barw, zależy od warunków oceny — rodzaju oświetlenia, otoczenia, kąta obserwacji, kondycji w danym momencie i cech samego obserwatora, które ponadto u tej samej osoby zmieniają się z wiekiem, m.in. wskutek zażółcenia siatkówki. Ponadto na drodze samych tylko obserwacji wzrokowych często bardzo trudno jednoznacznie sprecyzować, na czym dokładnie zmiana polega, a w przypadku materiałów stosowanych w konserwacji dzieł sztuki ma to istotne praktyczne znaczenie.

W przypadku badanych próbek wykonano serie pomiarów barwometrycznych przed poddaniem ich przyspieszonemu starzeniu i po, czasem wykonując także pomiary w trakcie cyklu starzeniowego, czy też — w przypadku niektórych warstw malarskich — przed naniesieniem na ich powierzchnię werniksu lub innej substancji i po tych zabiegach.

W toku własnych badań korzystano z różnej aparatury pomiarowej — fotokolorymetru i spektrofotometrów o różnych lub identycznych geometriach pomiarowych, lecz różnych producentów, co stworzyło możliwość zdobycia doświadczenia i porównania pomiarów otrzymanych dla tych samych serii próbek warstw malarskich²⁹. Do ostatecznego opracowania wyników badań posłużyły pomiary wykonane spektrofotometrami odbiciowymi o geometrii sferycznej (d/8). Jak wspomniano powyżej, przy geometrii pomiarowej d/8 próbka jest oświetlona światłem rozproszonym, co pozwala na równomierne odbicie go nawet od nieregularnej powierzchni i światło od niej odbite jest obserwowane niemal pod kątem prostym do jej powierzchni (pod kątem 8° do normalnej do tej powierzchni). Geometria d/8, jeśli zastosuje się pułapkę połysku (SCE), pozwala na zbliżenie pomiaru do rzeczywistego postrzegania barwy, czyli z uwzględnieniem wpływu właściwości powierzchni, tj. połysku. Z kolei pomiar z włączoną składową zwierciadlaną (SCI) pozwala za zarejestrowanie całkowitego odbicia badanego materiału, niejako pomijając właściwości powierzchni i wynikające z nich zjawiska optyczne. W przypadku badań próbek warstw malarskich otrzymanych z różnorodnych farb stosowanych w restauracji malarstwa sztalugowego zdecydowano włączyć składową zwierciadlaną w pomiar, co podyktowane zostało tym, że badano jednocześnie próbki matowe — niewerniksowane i błyszczące — werniksowane. W przypadkach innych, bardziej jednorodnych serii próbek mógł być stosowany pomiar SCE. Warto nadmienić, że wykonanie kolejno po sobie pomiarów z włączeniem

²⁹ Posługiwano się kolorymetrem Dr Lange Micro Color (IRPA, Bruksela), spektrofotometrami X-Rite o geometrii 0/45 oraz spektrofotometrami o geometrii sferycznej d/8: Minolta 508/d (Instytut Przemysłu Tworzyw i Farb, Gliwice), Minolta CM2002 (Instituut Collectie Nederland, Amsterdam), McBeth Color Eye (IBIPO w Łodzi) i X-Rite SP64 o identycznej geometrii (ZKMIRP, UMK w Toruniu).

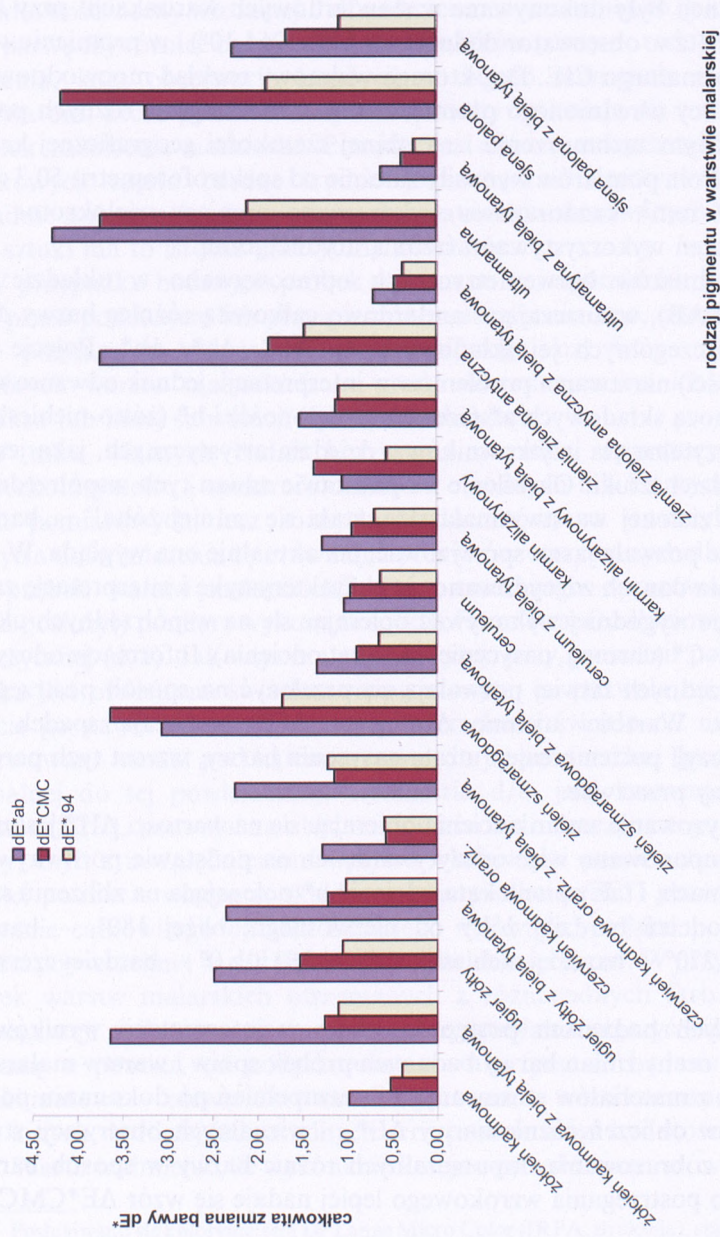
i wyłączeniem składowej zwierciadlanej, co umożliwiają niektóre typy spektrofotometrów, i porównanie uzyskanych krzywych odbicia pozwala na pośrednie oszacowanie wartości połysku.

Pomiary wszelkich badanych próbek – czy to warstw malarskich, żywic czy innych substancji były dokonywane w standardowych warunkach: przy kącie obserwacji 10° (tzw. obserwator dodatkowy CIE 1964 10°) i w promieniowaniu iluminantu normalnego CIE. D_{65} , którego widmowy rozkład mocy odpowiada rozkładowi mocy uśrednionego promieniowania dziennego w różnych porach dnia, przy różnym zachmurzeniu i na różnej szerokości geograficznej krajów europejskich. Pola pomiarów wynosiły zależnie od spektrofotometru $50,3$ i $47,5$ mm^2 lub $20,6$ mm^2 , każdorazowo wykonywano pomiary wielokrotne i do dalszych obliczeń wykorzystywano średnią arytmetyczną.

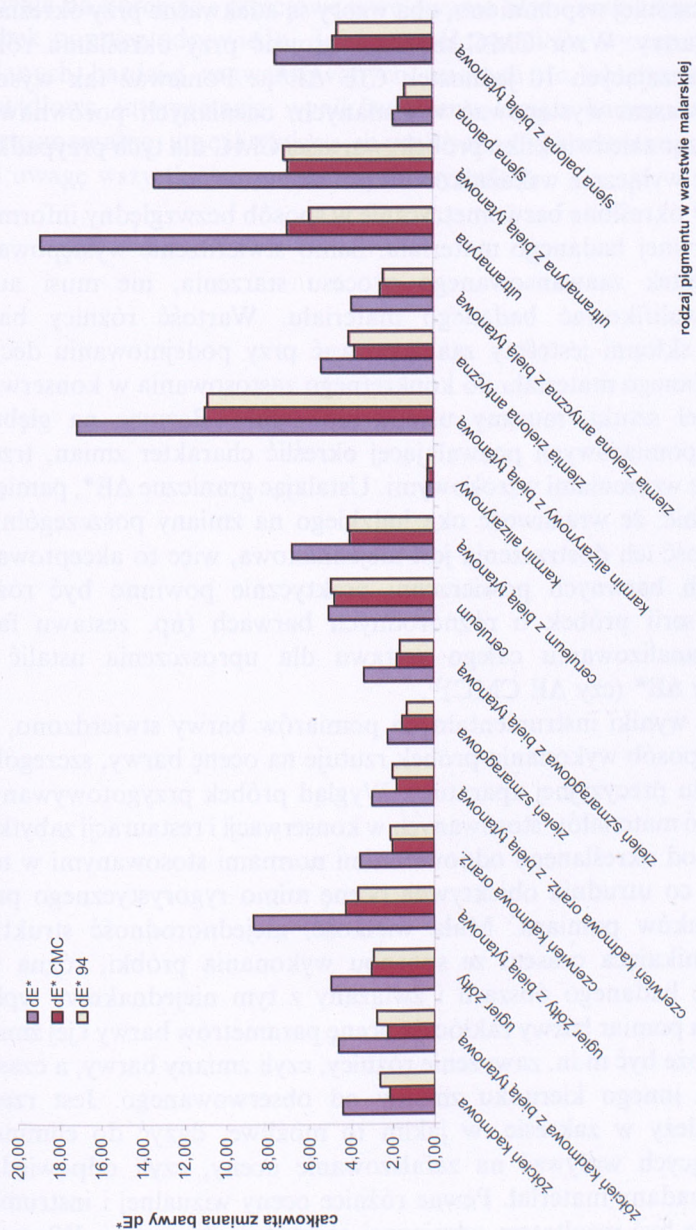
Wyniki pomiarów barwometrycznych opracowywano w układzie CIE $L^*a^*b^*$ (CIELAB), wyznaczając standardowo całkowitą różnicę barwy ΔE^*_{ab} i różnice poszczególnych jej składowych, tj. ΔL^* , Δa^* , Δb^* . Pojęcie ΔL^* (różnica jasności) nie stwarza problemów w interpretacji, jednak odwzorowanie różnic za pomocą składowych a^* (czerwono-zieloność) i b^* (żółto-niebieskość) jest za mało czytelne dla użytkowników z dziedzin artystycznych, jaką jest też konserwacja dzieł sztuki. Określenie na podstawie zmian tych współrzędnych, że barwa np. zielonej warstwy malarskiej stała się „mniej żółta” i „bardziej czerwona”, nie pozwala jasno sprecyzować, jak aktualnie ona wygląda. W toku opracowywania danych zdecydowano, że charakterystykę i interpretację zmian barwy znacznie wygodniej wykonywać opierając się na współrzędnych układu CIE $L^*C^*h^* - C^*$ (chroma, nasycenie) i h^* (kąt odcienia). Informacje odczytane z tych współrzędnych łatwiej pozwalają się przełożyć na sposób postrzegania różnic barwy. Wartości ujemne ΔL^* oraz ΔC^* oznaczają spadek tych parametrów, czyli pociemnienie i utratę nasycenia barwy, wzrost tych parametrów – zmiany przeciwne.

Charakteryzowanie zmian odcienia opierając się na wartości ΔH^* jest mniej czytelne, zaproponowano więc odczytywanie ich na podstawie porównywania różnic w stopniach, i tak zmiana kąta odcienia h^* polegająca na zbliżeniu się do 90° oznacza odcień bardziej żółty od pierwotnego, bliżej 180° – bardziej zielony, bliżej 270° – bardziej niebieski, a bliżej 360 lub 0° – bardziej czerwony (zob. il. 4).

We własnych badaniach postępując dalej w interpretacji wyników instrumentalnej oceny zmian barwy badanych próbek spoiw i warstw malarskich uzyskiwanych z materiałów stosowanych do uzupełnień po dokonaniu porównania wyników obliczeń różnic barwy ΔE^*_{ab} i wizualnych obserwacji stwierdzono, że do zobrazowania dopuszczalnych różnic barwy w sposób bardziej przystający do postrzegania wzrokowego lepiej nadaje się wzór ΔE^*_{CMC} (l:c) lub wzór ΔE_{94} .



II. 7. Porównanie obliczeń zmian barwy warstw malarskich powstałych po zawerniksowaniu (farby żywiczne Restauro, Maimeri)
 Dla współczynników l , c wzoru CMC przyjęto wartość 1, dla wzoru ΔE_{94} $k_L = 2$, $k_C = 1$, $k_H = 1$



Il. 8. Przykład oceny zmian barwy powstałych wskutek przyspieszonego starzenia warstw malarskich z farb żywicznych Maimeri

(W prezentowanym przykładzie w stosowanych wzorach ΔE CMC i ΔE_{94}) dla odpowiednich współczynników przyjęto wartość 1

We wzorze CMC różnice barwy określane są elipsoidami, których półosie jasności i chroma reguluje się przez odpowiedni dobór współczynników l oraz c , w ΔE_{94} bierze się pod uwagę udział jasności (S_L), nasycenia (S_C) i odcienia (S_H) w ogólnym odczuciu barwy ustalając ich wielkość za pomocą współczynników k_L , k_C , k_H . Jak wcześniej wspomniano, oba wzory są adekwatne przy określaniu małych różnic barwy. Wzór CMC można stosować przy określaniu różnic barwy nieprzekraczających 10 jednostek CIE ΔE^*_{ab} . Ponieważ tak wysokie wartości mogą czasem występować w badanych, ocenianych porównawczo zestawach, dotycząc zaledwie kilku próbek, wartości CMC dla tych przypadków należy traktować wyłącznie wskaźnikowo³⁰.

Wartości ΔE^* określone barwometrycznie w sposób bezwzględny informują o stabilności barwej badanego materiału. Samo stwierdzenie występowania zmian, np. wskutek zaawansowanego procesu starzenia, nie musi automatycznie dyskwalifikować badanego materiału. Wartość różnicy barw, tj. zmiany, jaką skłonni jesteśmy zaakceptować przy podejmowaniu decyzji o dopuszczeniu danego materiału do konkretnego zastosowania w konserwacji i restauracji dzieł sztuki, musimy ustalić arbitralnie. Bazując na głębszej analizie danych pomiarowych pozwalającej określić charakter zmian, trzeba też posiłkować się wrażeniami wzrokowymi. Ustalając graniczne ΔE^* , pamiętać należy jednocześnie, że wrażliwość oka ludzkiego na zmiany poszczególnych barw, tzn. zdolność ich dostrzeżenia jest niejednakowa, więc to akceptowalne ΔE^* dla różnych barwnych powierzchni praktycznie powinno być różne. Podczas badań serii próbek o różnorodnych barwach (np. zestawu farb) można po przeanalizowaniu całego zestawu dla uproszczenia ustalić na jednym poziomie ΔE^* (czy ΔE CMC)³¹.

Opracowując wyniki instrumentalnych pomiarów barwy stwierdzono, jak bardzo rodzaj i sposób wykonania próbek rzutuje na ocenę barwy, szczególnie przy zastosowaniu precyzyjnej aparatury. Wygląd próbek przygotowywanych na potrzeby badań materiałów stosowanych w konserwacji i restauracji zabytków odbiega na ogół od określanego odpowiednimi normami stosowanymi w tego typu badaniach, co utrudnia obiektywną ocenę mimo rygorystycznego przestrzegania warunków pomiaru. Mała wielkość, niejednorodność struktury powierzchni, wynikająca czasem ze sposobu wykonania próbki, różna siła krycia w obrębie badanego obszaru i związany z tym niejednakowy wpływ barwy podłoża na pomiar barwy zakłócają ocenę parametrów barwy i jej zmian, czego efektem może być m.in. zawyżenie różnicy, czyli zmiany barwy, a czasem także wykazanie innego kierunku zmiany od obserwowanego. Jest rzeczą oczywistą, że należy w zakresie, w jakim to możliwe, dążyć do eliminacji czynników mogących wpływać na zafałszowanie oceny, czyli odpowiednio przygotowywać badany materiał. Pewne różnice oceny wizualnej i instrumentalnej mogą także być rezultatem odmiennej geometrii obserwacji. Włączenie

³⁰ Wyniki tak opracowanych pomiarów dla badanych warstw malarskich i błon żywic są zamieszczone w aneksie VII.B cytowanej rozprawy doktorskiej.

³¹ Przykładowe opracowanie w publikacjach cytowanych w przyp. 25.

odbicia lustrzanego (połysku powierzchni) w pomiar barwy (SCI) powoduje większy wpływ połysku na pomiar, zwłaszcza w przypadku powierzchni o małej remisji (ciemnych), niż to obserwuje się w przypadku standardowej oceny wizualnej. Świadomość wpływu poszczególnych składowych na odczucie barwy pozwala na korekcję i częściowe niwelowanie błędu wynikającego z charakteru próbek poprzez odpowiedni dobór współczynników występujących we wspomnianych bardziej zaawansowanych wzorach do obliczania różnic barwy. Prawidłowa interpretacja wyników oceny zmian barwy, wizualnej łącznie z instrumentalną, umożliwiającą ich praktyczne wykorzystanie, wymaga wzięcia pod uwagę wszystkich wymienionych czynników.