

Grupa BIZOT

Podręcznik #1

Wdrożenie wytycznych „Zielonego Protokołu Bizot”

Ostatnia aktualizacja: wrzesień 2023

Celem pierwszego podręcznika towarzyszącego zaktualizowanemu „Zielonemu Protokołowi Bizot” jest podzielenie się ze środowiskiem muzealników przesłankami naukowymi, narzędziami i studiami przypadków po to, aby ułatwić przyjęcie jego wytycznych oraz wesprzeć muzea we wdrażaniu rozwiązań w zakresie regulacji warunków klimatu, które są bezpieczne dla zbiorów i jednocześnie pozwolą na zmniejszenie poziomu zużycia energii i emisji dwutlenku węgla.

Spis treści

1. Lista muzeów stosujących wytyczne Bizot.....	3
2. Dane naukowe stojące za wytycznymi	3
3. Wprowadzenie do mikroklimatu	20
4. Efektywność energetyczna	23
5. Literatura	25
6. Dzielenie się doświadczeniami	26
7. Narzędzia praktyczne	27



1. Lista muzeów stosujących wytyczne Bizot

Poniższa lista instytucji będzie aktualizowana.

- Art Gallery of New South Wales (od 2014)
- Art Gallery of Ontario
- CSMVS
- Guggenheim
- Louisiana Museum of Modern Art
- National Galleries of Scotland
- National Gallery Singapore
- National Gallery of Victoria
- Museum of Fine Arts Budapest
- Museum Nacional d'Art de Catalunya
- MoMA
- M+
- Ordrupgaard
- Rijksmuseum (od 2022)
- Tate
- Victoria and Albert Museum

2. Dane naukowe stojące za wytycznymi

Uwaga: W niniejszej sekcji Podręcznika #1 podsumowano wyniki badań naukowych dotyczących wpływu warunków środowiska na zbiory sztuki. Ma to na celu dostarczenie merytorycznych podstaw do praktycznego zastosowania wytycznych środowiskowych zawartych w „Zielonym Protokole Bizot”.

Ta część dokumentu odzwierciedla perspektywę zespołu projektu Managing Collections Environments Initiative i nie ma na celu zastąpienia powszechnie obowiązujących norm i wytycznych, które są dobrze ugruntowane w obszarze dziedzictwa kulturowego. Prosimy o przesyłanie swoich komentarzy na adresy: mlukomski@getty.edu oraz ccwinter@getty.edu.

ZAKRES

W ostatnich latach, aby w sposób odpowiedzialny ochronić wrażliwe obiekty, zwraca się coraz większą uwagę na zarządzanie warunkami we wnętrzach budynków muzealnych oraz redukcję zużycia energii i emisji dwutlenku węgla. Powszechnie uznaje się, że budynek muzeum i jego zbiory powinny być postrzegane jako jeden system. Warto pamiętać, że znaczne oszczędności energii można osiągnąć poprzez zmianę algorytmu sterowania urządzeniami i podejmowanie działań takich jak: uszczelnienie konstrukcji, poprawa izolacji w celu zmniejszenia zysków/strat ciepła i optymalizacja szybkości wentylacji. Interwencje w konstrukcję budynku nie zawsze są możliwe, wykazano jednak, że już samo poszerzenie zakresów parametrów temperatury i wilgotności przynosi znaczne zmniejszenie zużycia energii.

Badania prowadzone od lat 90. XX wieku pozwoliły ustalić zakres akceptowalnych warunków klimatu dla obiektów. Uogólniając, można stwierdzić, że podwyższone temperatury przyspieszają degradację chemiczną, a w połączeniu z wysoką wilgotnością względną (RH) zwiększają z czasem zagrożenie atakiem biologicznym. W praktyce wybór zakresu temperatury dla przestrzeni wystawowych jest silnie ograniczony ze względu na konieczność uwzględnienia komfortu osób w nich przebywających. Z drugiej strony badania nad odpowiedzią materiałów na zmiany ich wilgotności wykazały, że zbiory muzealne mogą tolerować większe wahania wilgotności względnej, niż wcześniej sądzono. Wniosek ten znalazł odzwierciedlenie w opublikowanym w 2015 roku „Zielonym Protokole Bizot” oraz we wspólnej deklaracji IIC (Międzynarodowego Instytutu Konserwacji Dzieł Historycznych i Artystycznych) i ICOM-CC (Międzynarodowej Rady Muzeów – Komitetu ds. Konserwacji) z 2014 roku.

Pomimo że wytyczne zostały opracowane, ich wdrożenie napotkało przeszkody. Jedną z nich było przekonanie, że istniejąca wiedza naukowa nie w pełni wyjaśnia zagrożenia związane z wahaniami temperatury i wilgotności. Obawy te zostały wyrażone już w tekście wspomnianej deklaracji IIC i ICOM-CC: „Wymagania dotyczące warunków środowiska dla zbiorów i materiałów stanowią złożone zagadnienie, które konserwatorzy i naukowcy zajmujący się kwestiami konserwatorskimi powinni aktywnie analizować i starać się rozwiązać”.

Niniejszy dokument ma na celu podsumowanie wyników badań naukowych i danych pochodzących z monitoringu parametrów klimatu, które były prowadzone od czasu publikacji pierwszej wersji „Zielonego Protokołu Bizot”, dostarczając ogólnych informacji na temat tego, jak nauka o konserwacji rozumie wpływ środowiska na zbiory. Wskazuje również konkretne wyniki, narzędzia i metody stworzone w celu wspierania rozwoju strategii zrównoważonej regulacji warunków klimatu w muzeach. Nie jest to jednak przewodnik kompleksowy. Wiele przedstawionych informacji można znaleźć w rozdziale 24 podręcznika ASHRAE (Amerykańskiego Stowarzyszenia Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji), na stronach internetowych GCI (Instytutu Konserwacji Getty’ego) oraz CCI (Kanadyjskiego Instytutu Konserwacji), a także w innych ogólnie dostępnych źródłach.

Należy również podkreślić, że informacje i narzędzia opisane w tym dokumencie powinno się stosować w instytucjach w kontekście zarządzania ryzykiem. Wymaga to ustalenia i oceny potencjalnych zagrożeń dla obiektów kultury i zbiorów dziedzictwa, ustalenia zagrożeń priorytetowych oraz opracowania strategii ich minimalizowania. Zagrożenia związane z klimatem należy analizować w odniesieniu do innych zagrożeń i często nie stanowią one największego zagrożenia dla zbiorów. Przy rozważaniu strategii zarządzania środowiskiem należy uwzględnić konsekwencje finansowe, wpływ na środowisko oraz dostępność zbiorów, a także spodziewany czas zachowania zbiorów w dobrym stanie (dalej „trwałość”) i politykę danej instytucji w zakresie opieki nad zbiorami, zgodną z jej misją.

WPŁYW WARUNKÓW ŚRODOWISKA NA ZBIORY

USZKODZENIA BIOLOGICZNE

Rozwój pleśni w środowisku muzealnym może stanowić poważne zagrożenie dla estetyki oraz strukturalnej integralności gromadzonych obiektów. Pleśń prowadzi do dezintegracji i/lub przebarwień skóry, tkanin, papieru, a także drewna, warstw malarskich i szkła. Zjawiska wzrostu i rozwoju pleśni na powierzchni materiałów są spowodowane wysoką wilgotnością

względnej lub wilgotnością w połączeniu z wystarczająco wysoką temperaturą. Najbardziej kompleksowe, a jednocześnie zachowawcze dane dotyczące wzrostu pleśni pochodzą z badań nad żywnością. Przypadki mikroskopijnej pleśni zgłaszano przy wilgotności względnej tak niskiej jak 60% (Ohtsuki 1990; Strang 2013), co wyznacza ostrożną granicę zapobiegania rozwojowi pleśni na dowolnym materiale i w dowolnej temperaturze.

Systematyczne badania materiałów zainfekowanych mieszaniną gatunków pleśni pozwoliły na określenie relacji wilgotności, temperatury i czasu potrzebnego do zaobserwowania wzrostu pleśni. Na przykład na wysoce podatnych materiałach pleśń stanie się widoczna po 3 miesiącach przy 70% wilgotności względnej lub po tygodniu przy 85%. Stabilna wilgotność względna w „niebezpiecznej strefie” nie jest lepsza od zmiennej wilgotności. Okresowe spadki wilgotności mogą być korzystne, ponieważ resetują zegar wzrostu pleśni do zera.

Powyższe warunki dotyczą zagrożeń skrajnych. Badania eksperymentalne, na których się opierały, obejmowały wysoce wrażliwe materiały, które w punkcie wyjścia były już zanieczyszczone zarodnikami pleśni. Większość zbiorów muzealnych jest mniej podatna na rozwój pleśni. Istnieje również wiele przykładów zbiorów narażonych na wysoką wilgotność, w których nie obserwuje się rozwoju pleśni (Maekawa, Beltran i Henry 2015).

Wnioski:

Wartość graniczną 60% wilgotności względnej w temperaturze pokojowej można uznać za całkowicie bezpieczną pod względem ryzyka rozwoju pleśni. W praktyce nie należy spodziewać się wzrostu pleśni nawet przy znacznie wyższej wilgotności, zwłaszcza gdy wilgotność okresowo spada poniżej 60%, utrzymywana jest dobra cyrkulacja powietrza oraz regularnie przeprowadza się przeglądy i odkurzanie.

Zainfekowanie owadami to kolejna forma ataku biologicznego, która jest zależna od materiału i potencjalnie bardzo szkodliwa dla zbiorów muzealnych. Chociaż istnieje stosunkowo mało danych eksperymentalnych dotyczących związku między ryzykiem zaatakowania przez owady a parametrami klimatu, dobrze udokumentowany jest fakt, że poniżej 15°C owady, które mogą niszczyć zbiory dziedzictwa kulturowego, stają się mniej aktywne i przestają latać, co ogranicza ryzyko ich rozprzestrzenienia się. Ponadto niska wilgotność względna zmniejsza prawdopodobieństwo pojawienia się owadów, ponieważ ich jaja i larwy są wrażliwe na odwodnienie.

Wnioski:

Brak jest badań wskazujących, że niewielkie wahania wilgotności w średnim zakresie zwiększają ryzyko zainfekowania przez owady zbiorów muzealnych. Wysoka temperatura (szczególnie przy wysokiej wilgotności względnej) stanowi problem, ponieważ zwiększa metabolizm owadów i przyspiesza ich cykl rozmnażania.

USZKODZENIA CHEMICZNE

Deterioracja materiałów zabytkowych, które charakteryzują się niestabilnością chemiczną, może prowadzić zarówno do utraty wytrzymałości mechanicznej, jak i wartości estetycznej obiektów muzealnych. Niektóre z materiałów powszechnie stosowanych przez artystów od drugiej połowy XIX wieku, takie jak papier, materiały fotograficzne, guma i wiele tworzyw sztucznych, są szczególnie podatne na degradację w określonych warunkach i mogą ulec zniszczeniu w ciągu kilku dziesięcioleci. Ponieważ szybki rozkład chemiczny materiałów organicznych jest w dużej mierze powodowany przez hydrolizę kwasową, wilgotność względna stanowi istotny parametr. Temperatura odgrywa tu jednak rolę krytyczną. Mechanizm uszkodzeń nie ogranicza się tylko do materiałów, które są zakwaszone od samego początku, ale obejmuje również te, które ulegają zakwaszeniu dopiero po ekspozycji na określone zanieczyszczenia wewnętrzne i zewnętrzne (np. tkaniny, papier i skóra). Zanieczyszczenia atmosferyczne (takie jak tlenki siarki i azotu, a także naturalne czynniki, np. ozon) mogą również przyspieszać chemiczną degradację materiałów. Ich wpływ można ocenić za pomocą specjalnych narzędzi, takich jak kalkulator opracowany w ramach europejskiego projektu MEMORI (Grøntoft et al. 2016).

Zgodnie uznaje się, że szybkość hydrolizy kwasowej jest iloczynem trzech czynników: czynnika zakwaszenia, czynnika temperatury i czynnika wilgotności względnej. Obecnie istnieją trzy modele pozwalające obliczyć szybkość rozkładu chemicznego lub trwałość szeregu materiałów o niskiej stabilności w zależności od temperatury i wilgotności względnej. Pierwszy model, opracowany przez *Image Permanence Institute*, określa wskaźnik zachowania na podstawie badania degradacji chemicznej octanu celulozy, polimeru obecnego w większości materiałów filmowych (Reilly 1995). Drugi model, stworzony przez Michalskiego (2000), wykorzystuje dane dotyczące degradacji papieru, filmu oraz barwników i jest uznawany za odpowiedni dla szerokiej kategorii materiałów organicznych o niskiej stabilności. Trzeci model, autorstwa Strliča i in. (2015), pochodzi z przeglądu danych dotyczących papieru i jest stosowany do papierów na bazie masy drzewnej, wyprodukowanych po 1850 roku. Modeli tych można używać do prognozowania trwałości materiałów względem trwałości w warunkach pokojowych: 20°C i 50% wilgotności względnej. Różnice w wynikach uzyskanych za pomocą tych trzech modeli są znikome w przedziale między 20% a 60% wilgotności względnej, zatem każdy z nich można stosować w tym zakresie, otrzymując nieomal takie same odpowiedzi.

Obliczenia dla zakresu temperatur i wilgotności „Zielonego Protokołu Bizot” dostarczają następujących wyników: wilgotność względna 60% i temperatura 20°C zmniejsza trwałość chemicznie niestabilnych obiektów do 0,75 w stosunku do przyjętej za 1 trwałości w warunkach pokojowych 20°C, 50% wilgotności względnej, podczas gdy 40% wilgotności względnej przy 20°C zwiększa trwałość do 1,35. Wyniki są znacznie bardziej dramatyczne w odniesieniu do temperatury: utrzymanie 25°C w galerii przy 50% wilgotności względnej zmniejsza trwałość do 0,5, podczas gdy 16°C przy 50% wilgotności względnej zwiększa trwałość do 1,7. W przypadku niestabilnych warunków klimatycznych, w tym nieoczekiwanych zdarzeń i wahań związanych z następstwem pór roku, szacunki mogą zakładać prostą liniową zależność od wilgotności względnej: na przykład, jeśli przez połowę roku jest 40% wilgotności względnej, a w drugiej jego połowie 60%, to rzeczywista średnioroczna wilgotność względna wyniesie 50%. Zależność

od temperatury jest jednak daleka od liniowej i nie można stosować uśrednionych wartości. W przypadku niestabilnych warunków temperaturowych należy przeprowadzić dokładne obliczenia przy użyciu najbardziej odpowiedniego z trzech opisanych modeli lub za pomocą innych narzędzi, takich jak HERle (Kozłowski i in. 2019).

Niższa temperatura zmniejsza szybkość wszystkich form reakcji chemicznych. Jednak w przypadku wilgotności względnej istnieją pewne krytyczne poziomy, których nie należy przekraczać w przypadku części okazów i obiektów. Przy określonej wilgotności względnej niektóre minerały mogą ulegać hydratacji, dehydratacji lub rozpuszczeniu. Gdy wchodzą one w skład porowatego kamienia, skorodowanego metalu lub historycznego okazu przyrodniczego, minerały te powodują rozpad obiektu. Istnieją określone krytyczne wartości wilgotności względnej dla wielu minerałów w kolekcjach przyrodniczych (Waller 2013). Metale obecne w zbiorach muzealnych, szczególnie brązy, mają złożoną chemię korozji, z różnymi krytycznymi wartościami wilgotności względnej. Chociaż nie ma uniwersalnie bezpiecznego zakresu wilgotności dla obiektów metalowych, korzystne jest utrzymywanie wilgotności względnej na niskim poziomie. Badania wykazały, że powyżej 75% wilgotności względnej należy spodziewać się gwałtownego przyspieszenia korozji i poważnych uszkodzeń. Również kolekcje szkła mogą być wrażliwe na wilgoć, ponieważ niestabilne szkło może zawierać składniki podatne na rozpuszczanie. Dla takich zbiorów zaleca się stabilną wilgotność na poziomie 40% wilgotności względnej (Koob i in. 2018).

Wnioski:

Zarówno temperatura, jak i wilgotność względna odgrywają rolę w chemicznej degradacji obiektów muzealnych, a ogólne wartości tych parametrów są ważniejsze niż ich zmienność. Podczas gdy wzrost temperatury zwiększa szybkość wszystkich reakcji chemicznych i wynikających z nich procesów degradacji, rola wilgotności względnej jest złożona. W zbiorach muzealnych znajdują się obiekty, które wymagają specyficznych warunków wilgotności względnej. Zbiory można zorganizować w sposób umożliwiający strategiczne umieszczenie wrażliwych obiektów w pomieszczeniach zapewniających pożądane warunki środowiska. W przypadku mniejszych obiektów możliwe jest zastosowanie rozwiązań mikroklimatycznych, takich jak małe pojemniki lub gabloty z kontrolowaną wilgotnością względną.

Zmiany wilgotności w zakresie 40–60% mają znacznie mniejszy wpływ na trwałość chemicznie niestabilnych obiektów niż zmiany temperatury. Chociaż zakres temperatur zaproponowany w „Zielonym Protokole Bizot” jest stosunkowo wąski i podyktowany komfortem ludzi, dla obiektów wykonanych z materiałów chemicznie niestabilnych wybór temperatury w przestrzeni wystawowej nie jest bez znaczenia. Przyjmuje się, że każde obniżenie temperatury o 5°C podwaja trwałość obiektów chemicznie niestabilnych.

USZKODZENIA MECHANICZNE

Uszkodzenia mechaniczne obiektów muzealnych mogą wynikać z niskiej lub zmiennej temperatury oraz wilgotności względnej. Najbardziej wrażliwe na zmiany klimatu są materiały

higroskopijne, takie jak drewno, papier, skóra czy pergamin, a także składniki warstw dekoracyjnych, na przykład kleje zwierzęce, farby czy octan celulozy. Materiały te występują w obrazach na podłożach drewnianych, meblach, rzeźbach oraz w obiektach dekoracyjnych – cennych i powszechnych rodzajach obiektów w zbiorach muzealnych. W większości przypadków chęć ich ochrony przed jakimikolwiek zmianami fizycznymi prowadzi do bardzo ścisłej regulacji warunków klimatu w przestrzeniach wystawowych i magazynowych. Uszkodzenia obiektów wywołane warunkami klimatu występują wówczas, gdy odpowiedź wymiarowa materiału (pęcznienie i skurcz) wynikająca z sorpcji i desorpcji pary wodnej jest zablokowana. Pęcznienie i skurcz elementu obiektu mogą zostać całkowicie ograniczone przez inny, sztywny i nieruchomy komponent (np. deska w sztywnej ramie), częściowo ograniczone, gdy element ten jest połączony z komponentem o innym współczynniku rozszerzalności (np. warstwa farby na drewnianym podłożu) lub ograniczone przez więzy wewnętrzne, gdy element ma różne współczynniki rozszerzalności w różnych kierunkach (promieniowym, stycznym lub wzdłużnym w drewnie) albo gdy w objętości obiektu pojawia się gradient wilgotności lub temperatury (np. masywna drewniana rzeźba). Ograniczone pęcznienie i skurcz powodują narastanie naprężenia w materiale. Gdy naprężenie przekracza krytyczny poziom, materiał może ulec trwałemu odkształceniu lub pęknięciu, a w przypadku obiektów złożonych może wystąpić rozwarstwienie.

Ryzyko uszkodzenia mechanicznego zależy nie tylko od amplitudy zmian temperatury i wilgotności względnej, ale również od ich poziomu. Dzieje się tak, ponieważ właściwości materiałów zmieniają się przy różnych poziomach temperatury i wilgotności względnej. Przy niskich temperaturach i niskiej wilgotności względnej materiały są w stanie szklistym, co oznacza, że dopuszczalne odkształcenia są niewielkie. Natomiast przy wysokich temperaturach i wysokiej wilgotności względnej materiały przechodzą w stan „ciągliwy”, co umożliwia ich większe odkształcenia. W zbiorach muzealnych bardzo powszechne są materiały zawierające klej zwierzęcy, takie jak zaprawa klejowa (grunt malarski), przeklejenie papieru i żelatyna, które doświadczają przejścia ze stanu „szklistego” (twarde i mocne) w „ciągliwy” (osłabione i kleiste) w warunkach wysokiej wilgotności względnej (>75%) lub wysokiej temperatury (>35°C) (Karpowicz 1989; Krzemień i in. 2016; Mecklenburg 1991; Michalski 1991; Bridarolli i in. 2022). W stanie „ciągliwym” materiały te łatwo ulegają deformacjom i są znacznie mniej podatne na pęknięcia niż w średnim zakresie wilgotności względnej przy temperaturze pokojowej. Większość farb przechodzi w stan szklisty w niższych temperaturach niż temperatura pokojowa, najczęściej mieszczących się w przedziale od 10 do 0°C (Hartin i in. 2015; Hagan 2017; Mecklenburg i Tumosa 1991). W temperaturze pokojowej farby są w stanie „ciągliwym” (elastyczne, ale wytrzymałe), natomiast w niskich temperaturach stają się kruche i łamliwe. Drewno z kolei staje się bardziej podatne na deformacje przy wilgotności względnej powyżej 75% i jeśli ograniczy się swobodę jego ruchu (np. jeżeli jest elementem konstrukcji mebla), może pękać podczas powrotu do średniej lub niskiej wilgotności.

Kolejnym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę przy ocenie ryzyka powstawania i narastania uszkodzeń fizycznych wywołanych zmianami klimatu, jest szybkość zmian temperatury i wilgotności. Wymiarowa odpowiedź materiału na zmiany temperatury i wilgotności względnej nie jest natychmiastowa. Dyfuzja wody w materiale zależy od rodzaju materiału, jego gęstości/porowatości, zawartości wilgoci oraz prędkości ruchu powietrza wokół materiału. Jest ona

również silnie zależna od temperatury – zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury i zmniejsza się wraz z jej spadkiem. Również kształt i rozmiar obiektu mają istotny wpływ na czas jego odpowiedzi na zmiany. Gruby, masywny obiekt będzie odpowiadał wolniej na zmianę wilgotności względnej w powietrzu niż cienki obiekt wykonany z tego samego materiału. Do określonej głębokości od powierzchni będą one odpowiadać z tą samą szybkością, jednak grubszy obiekt potrzebuje więcej czasu, aby osiągnąć równowagę wilgotnościową z otaczającym powietrzem. Ponadto obiekty pokryte warstwą o niższej przepuszczalności pary wodnej będą wymieniać ją z otaczającym powietrzem wolniej, a więc są mniej narażone na wahania wilgotności względnej.

Szybkie zmiany wilgotności względnej, w przeciwieństwie do zmian wolno postępujących, powodują większe gradienty wilgotności wewnątrz obiektu, a co za tym idzie – większe naprężenia. Z kolei stopniowo postępujące zmiany wilgotności względnej tej samej wielkości skutkują większą wartością odpowiedzi wymiarowej obiektu, która – gdy zostanie ograniczona przez więzy zewnętrzne – zwiększa zagrożenie uszkodzeniami. Zagrożenie to staje się największe przy największej „równowagowej” odpowiedzi wymiarowej. W rezultacie najgorszy scenariusz może spełnić się niezależnie od szybkości zmiany wilgotności względnej – to nie szybkość determinuje zagrożenie obiektów uszkodzeniami, tylko wielkość zmiany.

Ta kwestia wymaga jednak dalszych wyjaśnień. Wiadomo, że odkształcenie powodujące uszkodzenie w przypadku materiałów zabytkowych, takich jak farby akrylowe czy olejne, zmniejsza się wraz ze wzrostem szybkości odkształcenia (patrz np. Hagan 2017). Z tego powodu dla wrażliwych zbiorów można rozważyć dopuszczenie większych długoterminowych wahań temperatury i wilgotności, na przykład skorelowanych z porami roku. Przy czym – według Hagana – w przypadku farby olejnej na bazie bieli ołowiowej „szybkie” zmiany warunków klimatu, na przykład $\pm 10\%$ w ciągu jednej godziny, powodują jedynie niewielkie, tj. 20%, zmniejszenie odkształcenia powodującego uszkodzenie w porównaniu do zmiany zachodzącej w ciągu jednego dnia. Zmiana ta jest większa, zmniejszenie wynoszące około 40%, dla bardziej ciągliwej farby olejnej z bielą cynkową. Jednak to materiały kruche, a nie plastyczne, są bardziej narażone na uszkodzenia fizyczne, zatem to one dyktują regulację warunków klimatu w muzeach.

W literaturze brakuje dobrze udokumentowanych studiów przypadków lub wniosków z obserwacji zbiorów, w których wykazano uszkodzenia spowodowane szybkimi fluktuacjami wilgotności względnej w zakresie proponowanym przez „Zielony Protokół Bizot”. Takie obserwacje mogłyby w przyszłości ułatwić wskazanie szczególnie wrażliwych obiektów, które zgodnie z zapisem Bizot „wymagają specyficznej i bardziej rygorystycznej regulacji wilgotności względnej, w zależności od materiałów, stanu zachowania i historii danego dzieła sztuki”.

Wszystkie materiały odpowiadają wymiarowo również na zmieniającą się temperaturę. W przypadku większości materiałów higroskopijnych szybkość przepływu ciepła jest o kilka rzędów wielkości wyższa niż szybkość przepływu pary wodnej, a odpowiedź wymiarowa obiektu na zmiany temperatury jest znacznie mniejsza niż odpowiedź na zmiany wilgotności względnej. Dlatego odpowiedź na umiarkowane zmiany temperatury występujące w rzeczywistych warunkach ekspozycyjnych należy uznać za natychmiastową, a zagrożenie związane ze zmianami wymiarowymi wywołanymi temperaturą – za znikome.

Pierwsze modele oceniające zagrożenie wrażliwych obiektów muzealnych uszkodzeniami fizycznymi opracowano na początku lat 90. XX w. Wykorzystywano w nich rzeczywiste właściwości mechaniczne materiałów malarskich oraz zakładano, że zmiany wymiarowe materiałów są jednolicie ograniczone (Erhardt i Mecklenburg 1994; Erlebacher i in. 1992; Mecklenburg i Tumosa 1991; Mecklenburg 2005; Mecklenburg, Tumosa i Erhardt 1998; Michalski 1991; 1993). Wyniki pokazują, że fluktuacje wilgotności względnej w przybliżonym zakresie $\pm 15\%$ wokół poziomu średniego 50% wywołują odkształcenia mieszczące się w granicach sprężystości materiałów i należy je uznać za bezpieczne. Podobny zakres bezpiecznej wilgotności względnej uzyskano w modelowaniu metodą elementów skończonych dla masywnych obiektów drewnianych (rzeźby drewniane) (Jakieła, Bratasz i Kozłowski 2008; Soboń i Bratasz 2022), dla odspojień warstw malarskich (Tantideeravit i in. 2013) oraz dla zabytkowych tkanin (Bratasz i in. 2015) – w ostatnich trzech pracach analizowano wpływ cyklicznie powtarzających się obciążeń środowiskowych.

W ciągu ostatniej dekady przeprowadzono wiele badań mających na celu dalsze udoskonalenie tych modeli, a także ilościowe określenie zachowania unikatowej złożonej struktury dzieł sztuki wykonanych z materiałów wrażliwych na oddziaływanie wody. Główna krytyka istniejących modeli wynikała z faktu, że próbki materiałów historycznych są zbyt małe do testów mechanicznych i w związku z tym modele wykorzystują właściwości materiałowe współczesnych rekonstrukcji obiektów, a nie materiałów historycznych. Aby rozwiązać ten problem, zainicjowano systematyczny program badawczy w Getty Conservation Institute, skupiający się na mikromechanicznej charakterystyce historycznych farb – materiałów szczególnie trudnych do odwzorowania w laboratoriach lub pracowniach konserwatorskich (Łukomski, Bridarolli i Fujisawa 2022). Ponadto uszkodzenia drewna wywołane zmianami warunków klimatycznych (Lumes i Suiker 2021; Konopka i Kaliske 2022) oraz powstawanie pęknięć w warstwach malarskich pod wpływem zmian wilgotności (Bosco, Suiker, i Fleck 2021) zbadano przy użyciu modelowania pęknięcia, przy czym to ostatnie zrealizowano także dla farb degradujących w wyniku wytrącania się mydeł z różnymi jonami metali (Eumelen i in. 2023). Ostatnio, w ramach europejskiego projektu Collection Care, używając metody elementów skończonych opracowano pełnoskalowe trójwymiarowe modele obrazów na płótnie, aby analizować przestrzenny rozkład naprężeń w obrazach podczas wysychania oraz ewentualne powstawanie pęknięć w warstwach materiałów o różnym składzie (Janas i in. 2022; Lee i in. 2022).

Wszystkie dotychczas stworzone modele pokazują, że zagrożenie uszkodzeniami spowodowanymi zmianami klimatu zależy zarówno od stanu zachowania obiektu, jak i od naprężeń reszkowych między różnymi materiałami i elementami obiektu, które mogą występować nawet w stabilnych warunkach klimatycznych. Pierwszy problem stał się niedawno przedmiotem badań Bratasza i Vaziriego Sereshka (2018), którzy wykazali, że w przypadku obrazów w pełni rozwinięta siatka spękań zmniejsza wrażliwość warstw malarskich na zmiany wilgotności. Znaczenie naprężeń reszkowych w klejach pochodzenia zwierzęcego (składnikach przklejeń podobrazii płóciennych, połączeń meblowych, a także warstw malarskich) jest dobrze znane, jednak ilościowe określenie ich wpływu na proces pęknięcia wymaga dalszych badań. Aktualnie temat ten jest zgłębiany przez różne grupy badawcze, w tym przez Getty Conservation Institute.

Podsumowując, należy podkreślić, że badania prowadzone w ciągu ostatniej dekady przy użyciu bardziej szczegółowych danych materiałowych i bardziej złożonych modeli pozwoliły dobrze zrozumieć mechanizmy uszkodzeń i warunki krytyczne prowadzące do fizycznych uszkodzeń różnych typów obiektów muzealnych. Uznaje się, że wrażliwe zbiory muzealne mogą tolerować wahania wilgotności względnej w granicach $\pm 10\%$, podczas gdy większe wahania, przekraczające $\pm 20\%$, prowadzą do gwałtownego wzrostu ryzyka pojawienia się pęknięć.

Wiarygodność modeli mechanicznych określających zagrożenie uszkodzeniami wywołanymi przez zmiany warunków klimatycznych potwierdzono wielokrotnie poprzez monitorowanie odpowiednich typów obiektów (zarówno historycznych, jak i rekonstrukcji). Jednakże, jeśli istnieją wątpliwości co do możliwości ich zastosowania w przypadku konkretnej kolekcji lub specyficznych materiałów, wybór strategii regulacji warunków klimatu można oprzeć na koncepcji „udokumentowanej fluktuacji”. Koncepcja ta opiera się na obserwacji, że elementy, których odpowiedź wymiarową ograniczają więzy, i które już pękły z powodu nadmiernej fluktuacji w przeszłości, nie pękają dalej, dopóki wahanie nie przekroczy największej fluktuacji, która została udokumentowana w przeszłości (Michalski 2014; 1993; 2013). W związku z tym dla obiektów, które „zaaklimatyzowały się” do środowiska, w którym były przechowywane przez długi czas, bezpieczny zakres wilgotności względnej określany jest przez największe wahania tego parametru w przeszłości. Ogólnie przyjmuje się, że ryzyko powstania uszkodzeń fizycznych wykraczających poza te już skumulowane w przeszłości jest niezwykle małe, o ile wahania nie przekraczają wahań klimatu historycznego (Michalski 2014).

Koncepcja „udokumentowanej fluktuacji” jest czymś więcej niż tylko hipotezą teoretyczną. Została potwierdzona przez liczne obserwacje i badania obiektów. Na przykład długookresowy pomiar emisji akustycznej, przeprowadzony przez Strojckiego i in. (2014), wykazał jedynie mikroskopijny wzrost uszkodzeń w już dostrzegalnie popękanej XVIII-wiecznej drewnianej szafie eksponowanej w warunkach niestabilnego klimatu (fluktuacje krótkookresowe wilgotności względnej w zakresie 20% do 65, zmiany 30-dniowej średniej kroczącej w zakresie 30% do 50%). Podobne wyniki uzyskano w programie eksperymentalnym zrealizowanym przez Managing Collection Environments Initiative w Getty Conservation Institute (Łukomski i in. 2018). Zaobserwowany brak emisji akustycznej świadczącej o narastaniu spękań w obiektach (przechowywanych wcześniej w niekontrolowanym środowisku) eksponowanych w eksperymencie na coraz większe wahania wilgotności, jednoznacznie wsparł koncepcję „udokumentowanej fluktuacji”. Koncepcję tę dodatkowo potwierdzono eksperymentalnie na świeżo wykonanej desce – odnotowano jej trwałe odkształcenie po ekspozycji na wilgotność względna wynoszącą 20%, natomiast ponowna ekspozycja na taką samą wilgotność nie spowodowała już większych odkształceń. Ważne dowody zebrali także badacze i konserwatorzy z Rijksmuseum. Van Duin (2013) zwrócił uwagę, że chociaż po spadku wilgotności względnej do poziomu 20-30% udokumentowano uszkodzenie (nowe cienkie pęknięcie na powierzchni XVII-wiecznego intarsjowanego kabinetu), to jednak był to wyjątek – większość mebli przechowywanych w pracowni konserwatorskiej w tych samych (suchych) warunkach nie uległa uszkodzeniu, a przy łagodniejszych warunkach pogodowych nigdy nie zaobserwowano żadnych uszkodzeń. Oreszczyn, Cassar i Fernandez (1994) wykazali natomiast, że nie odnotowano widocznych różnic w uszkodzeniach pomiędzy zbiorami znajdującymi się w zabytkowych rezydencjach z zainstalowanymi systemami regulacji klimatu a tymi bez jakiegokolwiek regulacji.

Wpływ koncepcji „udokumentowanej fluktuacji” na projektowanie regulacji warunków klimatu w muzeach jest nie do przecenienia. Większość dzieł sztuki przed ich przeniesieniem do klimatyzowanych budynków muzealnych była wystawiona i poddana wpływowi naturalnych klimatów. Ryzyko mechanicznego uszkodzenia tego typu obiektów nie może być uzasadnieniem dla bardziej rygorystycznej regulacji warunków klimatu wykraczającej poza historyczne wartości. Wyjątkiem są nowe i niedawno odrestaurowane obiekty, które wcześniej nie były wystawione na szersze wahania klimatyczne, lub obiekty, w przypadku których obserwuje się postęp uszkodzeń nawet w bardzo ściśle kontrolowanych warunkach klimatycznych.

Wnioski:

Często rygorystyczna regulacja wahań temperatury i wilgotności w muzeach jest podyktowana chęcią uniknięcia fizycznych uszkodzeń dzieł sztuki spowodowanych klimatem. Badania naukowe przeprowadzone w ciągu ostatnich trzech dziesięcioleci wykazały, że wrażliwe obiekty muzealne mogą tolerować wahania wilgotności względnej w zakresie $\pm 10\%$, podczas gdy zmiany przekraczające $\pm 20\%$ wiążą się z szybko rosnącym zagrożeniem uszkodzeniami. Umiarkowane wahania temperatury występujące w rzeczywistych warunkach ekspozycji w muzeach stwarzają dla zbiorów znikome zagrożenie uszkodzeniami fizycznymi. Decyzje dotyczące poziomu regulacji warunków klimatu dla zbiorów mogą również opierać się na koncepcji „udokumentowanej fluktuacji”. Wymaga to jednak znajomości historycznego klimatu oraz upewnienia się, że obiekty zaaklimatyzowały się do niego. W praktyce może to wymagać monitorowania narastania uszkodzeń dla szczególnie wrażliwych obiektów, tych z nieznaną historią warunków klimatu lub obiektów po konserwacji, które nie były eksponowane na wahania tych warunków.

MONITOROWANIE W DZIEŁACH SZTUKI ZMIAN FIZYCZNYCH WYNIKAJĄCYCH Z WARUNKÓW KLIMATU

Jak omówiono powyżej, nauka o dziedzictwie wypracowała dwa ogólne podejścia do formułowania specyfikacji warunków klimatu dla zbiorów muzealnych zagrożonych uszkodzeniami fizycznymi. Pierwsze opiera się na analizie fizycznej odpowiedzi materiałów i obiektów na wahania wilgotności względnej i temperatury, drugie na analizie historycznych warunków klimatycznych, do których obiekty mogły się „zaaklimatyzować”. Te dwa podejścia mają ograniczoną możliwość przewidywania zagrożeń dla obiektów wykonanych z nieznanymi lub słabo zbadanymi materiałami bądź dla obiektów o zbyt krótkiej lub nieznannej historii warunków przechowywania w przypadku których nie jest pewne, czy aklimatyzacja miała miejsce. Mimo to można podchodzić mniej restrykcyjnie do specyfikacji klimatycznych dla zbiorów zawierających takie obiekty, jeśli monitoruje się stan zachowania zbiorów, najlepiej za pomocą wysoko czułych, nieinwazyjnych technik, które pozwalają opiekunom na modyfikację strategii regulacji warunków klimatu, zanim zostaną zauważone nieakceptowalne zmiany w obiektach.

Najłatwiej dostępną i niedrogą techniką jest fotografia. Umożliwia ona porównanie zmian na powierzchni obiektu i – jeśli aparat jest odpowiednio ustawiony – także jego całkowitego odkształcenia. Do szczegółowego uchwycenia detali (takich jak końce pęknięć i łuski farb) można zastosować makrofotografię, a fotografia poklatkowa z kolei jest w stanie pomóc w śledzeniu narastania pęknięć bądź deformacji w czasie. Fotografie można rutynowo wykonywać w przestrzeni ekspozycyjnej i w magazynach. Wadą tego rozwiązania jest trudność w odtworzeniu za każdym razem tych samych warunków robienia zdjęć (pozycja aparatu, odległość, oświetlenie). Ponadto użycie fotografii poklatkowej wymaga instalacji kamery i oświetlenia na stałe, co w wielu przypadkach może być niemożliwe. Fotografii można również używać do precyzyjnego uchwycenia kształtu obiektu (fotogrametria), jednak w przypadku takich pomiarów często bardziej efektywne okazuje się skanowanie 3D, zwłaszcza że skanery wykorzystujące światło strukturalne stały się ostatnio znacznie tańsze i coraz więcej muzeów ma do nich dostęp. Pomiary za pomocą skanera ręcznego można wykonać w ciągu kilku minut (tym bardziej że nie ma potrzeby rejestrowania całego obiektu, a wystarczy jedynie utrwalić interesujący element), z dokładnością pomiarów punktowych lepszą niż 1 mm. Takie pomiary powtarzane w stałych odstępach czasu mogą pomóc uchwycić trwałe deformacje obiektu lub jego części. Główną wadą zarówno fotografii, jak i skanerów 3D jest to, że wyniki uzyskuje się w pewnych odstępach czasowych, a ich skrócenie uczyniłoby pomiary bardzo pracochłonnymi i potencjalnie uciążliwymi. Do monitorowania deformacji wywołanych warunkami klimatu można również używać czujników odkształceń wykorzystujących folię oporową lub światłowodowe siatki Bragga. Zapewniają one ciągłe pomiary deformacji powierzchni w czasie rzeczywistym. Czujniki odkształceń mogą być niezwykle czułe, a tym samym zdolne do śledzenia odpowiedzi obiektu na wahania klimatyczne, jednak trzeba je przymocować do powierzchni, a informacja pochodzi tylko z miejsca kontaktu z czujnikiem. Skuteczna ocena trwałej deformacji wymagałaby instalacji wielu takich czujników, co może być już bardzo trudne do wdrożenia.

Szczególnie interesujące w kontekście monitorowania zbiorów są techniki pomiarowe pełnego pola, zdolne do wykrywania defektów strukturalnych materiałów. Jedną z takich technik jest termografia. Jest to metoda szybka, nieinwazyjna, pozwalająca na wykrywanie niejednorodności i defektów znajdujących się pod powierzchnią materiałów. Podczas pomiarów podnosi się temperaturę powierzchni przy użyciu lampy lub ciepłego powietrza. Ubytki w strukturze materiału i powierzchniowe odspojenie warstwy malarskiej tworzą bariery dla przepływu ciepła, co skutkuje powstawaniem cieplejszych obszarów na badanej powierzchni. Przedstawiające mapę miejsc uszkodzonych obrazy termograficzne można pozyskiwać okresowo w celu monitorowania w obiektach zmian spowodowanych warunkami klimatu. Termografia jest metodą aktywną, wymagającą subtelnego ogrzewania powierzchni. Kamery termograficzne są szeroko dostępne, jednak ważne jest, aby pamiętać, że jakość pomiarów w dużej mierze zależy od rozdzielczości przestrzennej używanej kamery, dlatego kluczowe znaczenie ma właściwy wybór sprzętu monitorującego. Siła sygnału zależy od stopnia ogrzania powierzchni oraz głębokości pod powierzchnią, na której zlokalizowane jest uszkodzenie. W niektórych przypadkach mapy termograficzne mogą być trudne do interpretacji (mniej przewodzącą ciepło warstwę można błędnie uznać za odspojenie), zwłaszcza gdy ogrzewanie powierzchni nie jest jednolite.

Bardzo precyzyjne informacje o stanie zachowania warstwy malarskiej można uzyskać za pomocą bardziej zaawansowanych technik optycznych – najczęściej są to: cyfrowa korelacja obrazu (DIC – Digital Image Correlation) oraz interferometria plamkowa (DSPI – Digital Speckle Pattern Interferometry). Obie techniki mogą rejestrować mikrometrowe zmiany wymiarów powierzchni wywołane ciepłem, obciążeniem lub wibracją i powiązać je z niedoskonałościami warstw dekoracyjnych. DSPI okazuje się rozwiązaniem szczególnie przydatnym przy analizie powierzchni obiektów artystycznych. Jest to technika interferometryczna pełnego pola, oparta na rejestrowaniu i analizowaniu światła laserowego rozproszonego przez badaną powierzchnię. Może wykrywać i mapować mikrouszkodzenia (na długo zanim staną się widoczne), a kiedy stosuje się wzbudzenie wywołane falami dźwiękowymi, można jednoznacznie odróżnić odspojenie warstwy malarskiej od niejednorodności tej warstwy (zadanie trudne do wykonania przy użyciu termografii i DSPI ze wzbudzeniem termicznym). Metoda jest przenośna i niezwykle czuła, jednak jej obsługa i analiza danych wymagają pewnego poziomu wiedzy technicznej i doświadczenia.

Jedną z najbardziej obiecujących metod monitorowania, odpowiednią do bezpośredniego i ciągłego śledzenia zmian fizycznych w obiektach dziedzictwa kulturowego, jest emisja akustyczna (AE – Acoustic Emission). Technika ta została wprowadzona do nauki o dziedzictwie pod koniec lat 90. XX w. i była systematycznie wykorzystywana przez różne grupy badawcze do śledzenia mikropęknięć w dziełach sztuki narażonych na potencjalnie szkodliwe warunki. Polega ona na pomiarze fal ultradźwiękowych generowanych podczas pęknięcia kruchego materiału. Fale te propagują się w materiale i są rejestrowane przez czujniki piezoelektryczne umieszczone na jego powierzchni. Technika AE jest odporna na zakłócenia i niezwykle czuła oraz możliwa do wykorzystania w trudnych warunkach; wykrywa powstawanie oraz narastanie pęknięć w skali mikrometrycznej. Wiele laboratoriów badawczych wspierających konserwację wprowadziło AE jako metodę analityczną do wyjaśniania mechanizmu powstawania uszkodzeń w materiałach artystycznych i oceny ich wielkości. Muzea również wykazują rosnące zainteresowanie AE z powodu jej zdolności do wspierania oceny nowych, istniejących i zmodyfikowanych strategii regulacji warunków klimatu w kontekście zagrożeń dla zbiorów. Technikę tę z powodzeniem zastosowano w Muzeum Narodowym w Krakowie (Polska), Getty Museum (Los Angeles, USA), Victoria & Albert Museum (Londyn, Wielka Brytania), National Trust (Wielka Brytania) oraz National Gallery of Victoria (Australia). Jednym z utrudnień w szerokim zastosowaniu AE do monitorowania obiektów dziedzictwa kulturowego jest koszt sprzętu oraz konieczność przeszkolenia personelu w zakresie przetwarzania i interpretowania danych AE. Jednak w ostatnich latach rosnące wykorzystanie AE w obszarze dziedzictwa kulturowego zapoczątkowało rozwój standardowych protokołów pomiarowych i analizy danych, które mogą bardziej efektywnie wspierać rozwój umiejętności personelu nieposiadającego specjalistycznego wykształcenia i rozszerzać społeczność użytkowników AE.

Podsumowując, dla osób, które chciałyby monitorować w obiektach z kolekcji zmiany fizyczne wynikające z wahań parametrów klimatu, dostępne są różnorodne, dobrze rozwinięte i szeroko przetestowane techniki. Metody te umożliwiają wykrywanie rozmaitych zjawisk prowadzących do uszkodzeń i różnią się kosztami zastosowania, czułością, powtarzalnością, a ich zastosowanie może wymagać wysokiego lub niskiego poziomu wiedzy technicznej. Większość z tych technik można skutecznie wykorzystywać do oceny zagrożeń wynikających z przyjętej

strategii regulacji warunków klimatu, a najbardziej czułe z nich mogą pełnić funkcję systemu wczesnego ostrzegania. Projektując strategię monitorowania, należy wybrać technikę (lub grupę technik) najbardziej wrażliwą na przewidywane procesy zniszczeń, ale także taką, która będzie efektywnie funkcjonować w ramach ograniczeń finansowych i organizacyjnych instytucji. Wybór obiektów do monitorowania jest tu kluczową decyzją. Powinny one być reprezentatywne dla całej kolekcji, a niekoniecznie najbardziej wrażliwe. Należy założyć, że obiekty najbardziej podatne na uszkodzenia mogą wymagać specjalnych sposobów przechowywania (np. szczelnych lub klimatyzowanych skrzyń albo gablot) i nie powinny determinować wymagań klimatycznych dla wszystkich obiektów w zbiorach.

NARZĘDZIA WSPIERAJĄCE OPRACOWANIE ZRÓWNOWAŻONYCH STRATEGII REGULACJI WARUNKÓW KLIMATU

Wykorzystanie narzędzi do analizy danych środowiskowych może wspierać zrównoważone zarządzanie zbiorami dziedzictwa kulturowego. Narzędzia te mogą dostarczyć użytkownikom lepszych możliwości zrozumienia środowiska zbiorów i powiązać ilościowo zagrożenie uszkodzeniami z wpływem środowiska. Po odpowiednim przeszkoleniu narzędzi tych mogą używać specjaliści w zakresie konserwacji i osoby podejmujące decyzje dotyczące budynków zabytkowych ze zbiorami. Oparte na wynikach badań modele degradacji i funkcje opisujące zależności pomiędzy czynnikami niszczącymi a uszkodzeniami stają się dla praktyków użyteczne, gdy włącza się je do wytycznych i norm instytucjonalnych, krajowych lub międzynarodowych. Przykładami niedawno zaktualizowanych wytycznych, które mogą instytucjom opiekującym się zbiorami przydać się do opracowania strategii regulacji warunków klimatu w przestrzeniach magazynowych i wystawowych, są: BS 4971:2017, BS EN 16893:2018, wytyczne środowiskowe AICCM (2018) oraz rozdział ASHRAE z 2019 roku, dotyczący muzeów, galerii, archiwów i bibliotek.

W wielu przypadkach bezpośrednie zastosowanie wytycznych może jednak nie być w pełni satysfakcjonujące. Modele degradacji oferują wysoki poziom szczegółowości w określaniu procesów deterioracji, wyborze materiałów i typów konstrukcji dla narażonych na niszczenie obiektów oraz określaniu stanu ich zachowania. Pozwalają również przewidzieć odpowiedź obiektów na konkretne wewnętrzne warunki klimatyczne. Taki poziom szczegółowości wykracza poza to, co mogą zaoferować ogólne wytyczne dotyczące środowiska muzealnego. Dlatego wiele grup badawczych zdecydowało się skupić na opracowywaniu narzędzi prognostycznych opartych na danych, które odzwierciedlają niuanse modeli degradacji i mogą być stosowane przez praktyków.

Szereg narzędzi do analizy danych koncentruje się na doskonaleniu naszego rozumienia środowiska muzealnego. Przykładem może być GCI Excel Tools (2021), które ma na celu statystyczne opisanie i wizualizację warunków klimatycznych w przestrzeni wystawowej lub magazynowej. Wilgotnościowy stosunek mieszania i temperatura punktu rosy są obliczane na podstawie danych o temperaturze i wilgotności względnej, a statystyki obejmują średnią ruchomą,

zakres ruchomy i percentyle. Dane są następnie wizualizowane za pomocą wykresów ciągów czasowych, rozkładów prawdopodobieństwa i wykresów psychometrycznych, z których każdy oferuje inny sposób patrzenia na środowisko. To i inne podobne narzędzia mogą być użyteczne dla każdego, kto chce porównać swoje środowisko z warunkami opisanymi w standardach i wytycznych. Narzędzia te mogą również pomóc w wywołaniu dyskusji na temat warunków środowiska w muzeach w multidyscyplinarnym gronie specjalistów zainteresowanych tematem oraz osób podejmujących decyzje, których wiedza na ten temat może mieć zróżnicowany poziom.

Inną kategorią narzędzi cyfrowych są te dedykowane prognozowaniu zmian, jakie mogą zajść w dziełach sztuki, poprzez wykorzystanie funkcji opisujących zależność pomiędzy czynnikami niszczącymi a uszkodzeniami dla określonych kategorii obiektów oraz konkretnych danych o warunkach klimatycznych (określonych przez użytkownika). W opublikowanym przez Cosaert i in. przeglądzie wybranych dostępnych narzędzi omówiono zarówno te analizujące zagrożenia uszkodzeniami fizycznymi spowodowanymi warunkami klimatu, światłem oraz degradacją chemiczną i biologiczną, jak i bardziej ogólne narzędzia dedykowane analizie ryzyka dla zbiorów muzealnych, uwzględniające połączenie różnych czynników niszczących (Cosaert i in. 2022), (tabela 5.1). Dodatkowe informacje na temat istniejących cyfrowych narzędzi wspierających podejmowanie decyzji w zakresie konserwacji prewencyjnej można znaleźć na stronach internetowych instytucji zajmujących się ich rozwojem, takich jak: Inicjatywa GCI „Managing Collection Environments” (MCE), Canadian Conservation Institute, Institute for Preventive Conservation University College London, Image Permanence Institute i innych.

Trudno przecenić potencjalny wpływ wykorzystania narzędzi cyfrowych w konserwacji prewencyjnej. Jednocześnie jest oczywiste, że narzędzia te muszą zostać odpowiednio wdrożone w praktyce. Materiały szkoleniowe i dydaktyczne dotyczące nowych i istniejących narzędzi, a także fora analizy danych (np. ConCode) powinny być łatwo dostępne w Internecie i prezentowane na konferencjach. Warto dodać, że rozwija się oferta warsztatów mających na celu szkolenie użytkowników narzędzi cyfrowych. Przygotowano m.in. cykl warsztatów dotyczących narzędzi cyfrowych wspierających podejmowanie decyzji, organizowany przez IPERION HS (Integrating Platforms for the European Research Infrastructure on Heritage Science), oraz warsztaty MCE GCI na temat podejmowania decyzji poprzez analizę danych dotyczących temperatury i wilgotności względnej. Możliwości szkoleniowe są ważne z kilku powodów. Po pierwsze, warsztaty zaznajamiają nowych użytkowników z możliwościami narzędzi cyfrowych, a już zaawansowanych użytkowników – ze zmianami i nowymi funkcjonalnościami wprowadzonymi przez twórców. Po drugie, prezentowanie uczestnikom różnych narzędzi i zaznajamianie z ich możliwościami pozwala stworzyć „zestaw narzędzi”, z którego uczestnicy – w zależności od danego scenariusza – wybierają te, które są najbardziej odpowiednie. Ponadto, niezależnie od samych narzędzi, szkolenia oferują uczestnikom możliwość rozpoczęcia budowy sieci kontaktów, umożliwiającej wymianę informacji i doświadczeń pomiędzy użytkownikami a twórcami narzędzi. Pozwala to uczestnikom na poznanie, jak inni wykorzystali analizę

danych do wspierania swoich celów środowiskowych i może sprzyjać bardziej ukierunkowanemu na użytkownika rozwojowi narzędzi.

Podsumowując, należy podkreślić, że istnieje szeroki wachlarz narzędzi cyfrowych wspierających podejmowanie decyzji w zarządzaniu warunkami środowiska w muzeach. Większość z nich jest ogólnodostępna i wspierana przez grupy badawcze zajmujące się modelowaniem uszkodzeń obiektów spowodowanych wpływem klimatu. Narzędzia cyfrowe oferują wyższy poziom szczegółowości niż ogólne wytyczne środowiskowe, ale ich efektywne wykorzystanie wymaga inwestycji czasu i wysiłku ze strony personelu. Niemniej jednak pozwalają one specjalistom w zakresie ochrony dziedzictwa lepiej zrozumieć związane z klimatem zagrożenia dla zbiorów, co w połączeniu z monitorowaniem kolekcji i korzystaniem z aktualnych wytycznych dotyczących środowiska może wspierać bardziej zrównoważoną praktykę muzealną.

Wnioski:

1. *Od czasu publikacji „Zielonego Protokołu Bizot” w 2015 roku rośnie świadomość, że kryzys klimatyczny jest jednym z najpoważniejszych zagrożeń, przed którymi stoi współczesny świat. Sektor związany z dziedzictwem kulturowym musi pilnie podjąć działania, aby przodować w rozwiązaniu tego problemu. Jednocześnie prowadzone są obszerne badania mające na celu zrozumienie złożoności zachowania materiałów i wymagań środowiskowych. Obecna wiedza dostarcza wielu dowodów, że przyjęcie szerszych zakresów parametrów klimatu nie zagraża bezpieczeństwu większości zbiorów.*
2. *Dowody naukowe, oparte na eksperymentach, obserwacjach i badaniach samych zasobów, wykazują, że zbiory muzealne bez problemu przetrwają w warunkach klimatycznych znacznie mniej restrykcyjnych niż tradycyjnie przyjmowane. Praktycy mogą korzystać z łatwych w użytku modeli i narzędzi prognostycznych opracowanych dla sektora dziedzictwa kulturowego, aby realistycznie oceniać zagrożenie uszkodzeniami spowodowanymi przez warunki temperatury i wilgotności względnej dla konkretnych kategorii zbiorów. Modele te mogą również pomóc w ustaleniu szczególnie wrażliwych obiektów, które można odseparować od pozostałych zbiorów i opiekować się nimi za pomocą specjalnie dostosowanych rozwiązań, bez potrzeby stosowania wąskich zakresów parametrów dla całej kolekcji.*
3. *Choć uznaje się, że zagrożenia dla zbiorów związane z wahaniami temperatury i wilgotności względnej w ramach parametrów wskazanych przez Grupę Bizot jest minimalne dla większości obiektów, należy również jasno stwierdzić, że wartości 40–60% dla wilgotności względnej, z dobową fluktuacją do 10% i temperaturą 16–25°C, nie mają większego znaczenia z naukowego punktu widzenia. Są to raczej wartości, które wydawały się w miarę akceptowalne dziesięć lat temu, gdy opracowywano poprzednią wersję „Zielonego Protokołu Bizot”. Obecnie należy je traktować raczej jako punkt wyjścia do wdrażania zrównoważonych strategii zarządzania warunkami klimatu. Nie jest to jednak postulat zastąpienia jednego rozwiązania nakazowego (normy $50 \pm 5\%$ wilgotności względnej, $21 \pm 2^\circ\text{C}$) drugim (normy 40–60% wilgotności względnej, 16–25°C), ale zalecenie przyjęcia podejścia bardziej*

tolerancyjnego przy określaniu parametrów klimatycznych, opartego na rzeczywistych potrzebach poszczególnych typów obiektów, zgodnie z aktualnymi badaniami naukowymi i doświadczeniem, a także praktykach instytucji zmierzających w stronę zrównoważonego rozwoju.

4. *Dla takiego przedsięwzięcia kluczowe jest, aby instytucje przyjęły podejście oparte na zarządzaniu ryzykiem, zastępując nim tradycyjne skoncentrowanie się na unikaniu niewielkich zagrożeń za wszelką cenę, co ma zwykle duży wpływ zarówno na finanse, jak i środowisko. Zmiana ta będzie łatwiejsza, jeśli przyjęte zostanie multidyscyplinarne podejście, angażujące wszystkie zainteresowane strony, tj. inżynierów, architektów, pracowników zarządzających budynkami i infrastrukturą techniczną, personel ochrony, administratorów, archiwistów, opiekunów zbiorów, konserwatorów, naukowców zajmujących się dziedzictwem, kuratorów i inwentaryzatorów.*

Literatura do wytycznych

- Bosco, Emanuela, Akke SJ Suiker, and Norman A Fleck. 2021. Moisture-induced cracking in a flexural bilayer with application to historical paintings. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 112: 102779.
- Bratasz, Łukasz, Michał Łukomski, Anna Klisińska-Kopacz, Witold Zawadzki, Krzysztof Dzierżęga, Marcin Bartosik, Jan Sobczyk, FJ Lennard, and Roman Kozłowski. 2015. Risk of Climate-Induced Damage in Historic Textiles. *Strain* 51 (1): 78–88.
- Bratasz, Łukasz, and Mohammad Reza Vaziri Sereshk. 2018. Crack saturation as a mechanism of acclimatization of panel paintings to unstable environments. *Studies in Conservation* 63 (sup1): 22–27.
- Bridarolli, Alexandra, Ashley Amanda Freeman, Naoki Fujisawa, and Michał Łukomski. 2022. Mechanical properties of mammalian and fish glues over range of temperature and humidity. *Journal of Cultural Heritage* 53: 226–35.
- Cosaert, Annelies, Vincent Laudato Beltran, Geert Bauwens, Melissa King, Rebecca Napolitano, Bhavesh Shah, and Joelle Wickens. 2022. Tools for the Analysis of Collection Environments: Lessons Learned and Future Development: Research Report. Annelies Cosaert and Vincent Laudato Beltran (eds.). Los Angeles: Getty Conservation Institute.
- Erhardt, David, and Marion Mecklenburg. 1994. Relative humidity re-examined. *Studies in conservation* 39 (sup2): 32–38.
- Erlebacher, Jonah D, Eric Brown, Marion F Mecklenburg, and Charles S Tumosa. 1992. The effects of temperature and relative humidity on the mechanical properties of modern painting materials. *MRS Online Proceedings Library* 267: 359–70.
- Eumelen, Gijs JAM, Emanuela Bosco, Akke SJ Suiker, and JJ Hermans. 2023. Chemo-mechanical model for degradation of oil paintings by amorphous and crystalline metal soaps. *European Journal of Mechanics-A/Solids* 97: 104827.
- Grøntoft, Terje, David Thickett, Paul Lankester, Stephen Hackney, Joyce H Townsend, Kristin Ramsholt, and Monica Garrido. 2016. Assessment of indoor air quality and the risk of damage to cultural heritage objects using MEMORI® dosimetry. *Studies in Conservation* 61 (sup1): 70–82.
- Hagan, Eric WS. 2017. Thermo-mechanical properties of white oil and acrylic artist paints. *Progress in Organic Coatings* 104: 28–33.
- Hartin, Debra Daly, Stefan Michalski, Eric Hagan, and Mylène Choquette. 2015. Overview of the CCI lining project: do linings prevent cracking and cupping in paintings? *American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works Paintings Specialty Group Postprints* 28: 137–50.

- Jakięła, Sławomir, Łukasz Bratasz, and Roman Kozłowski. 2008. Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. *Wood Science and Technology* 42: 21–37.
- Janas, Arkadiusz, Laura Fuster-López, Cecil Krarup Andersen, Angel Vicente Escuder, Roman Kozłowski, Katarzyna Poznańska, Aleksandra Gajda, Mikkel Scharff, and Łukasz Bratasz. 2022. Mechanical properties and moisture-related dimensional change of canvas paintings—canvas and glue sizing. *Heritage Science* 10 (1): 160.
- Karpowicz, Adam. 1989. In-plane deformations of films of size on paintings in the glass transition region. *Studies in Conservation* 34 (2): 67–74.
- Konopka, Daniel, and Michael Kaliske. 2022. Inside the icon: experimental and numerical analysis of climate impacts on the damage potential of panel paintings. Paper read at VirtEx: Virtual Experiments for Wooden Artwork, at Dresden: Institut für Statik und Dynamik der Tragwerke.
- Koob, Stephen P, N Astrid R Van Giffen, Jerzy J Kunicki-Goldfinger, and Robert H Brill. 2018. Caring for glass collections: the importance of maintaining environmental controls. *Studies in Conservation* 63 (sup1): 146–50.
- Kozłowski, Roman, Arkadiusz Kupczak, Artur Działo, Łukasz Bratasz, and Michał Łukomski. 2019. HERle: A Decision-Supporting Tool Based on Quantitative Assessment of Damage Risk. *The Mechanics of Art Materials and Its Future in Heritage Science*: 21.
- Krzemień, Leszek, Michał Łukomski, Łukasz Bratasz, Roman Kozłowski, and Marion F Mecklenburg. 2016. Mechanism of craquelure pattern formation on panel paintings. *Studies in Conservation* 61 (6): 324–30.
- Lee, Daniel Sang-Hoon Lee, Namseok Kim, Mikkel Scharff, Astrid Valbjørn Nielsen, Marion F Mecklenburg, Laura Fuster-López, Łukasz Bratasz, and Cecil Krarup Andersen. 2022. Numerical modelling of mechanical degradation of canvas paintings under desiccation. *Heritage Science* 10 (1): 130.
- Luimes, Rianne A, and Akke SJ Suiker. 2021. Numerical modelling of climate-induced fracture and deformation in wood: Application to historical museum objects. *International Journal of Solids and Structures* 210: 237–54.
- Łukomski, Michał, Vincent Beltran, Foekje Boersma, James Druzik, Ashley Freeman, Marcin Strojcecki, Thomas Learner, and Joel Taylor. 2018. Monitoring acoustic emission in an epidemiological pilot study of a collection of wooden objects. *Studies in Conservation* 63 (sup1): 181–86.
- Łukomski, Michał, Alexandra Bridarolli, and Naoki Fujisawa. 2022. Nanoindentation of historic and artists' paints. *Applied Sciences* 12 (3): 1018.
- Maekawa, Shin, Vincent L Beltran, and Michael C Henry. 2015. *Environmental Management for Collections: Alternative Conservation Strategies for Hot and Humid Climates*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- Mecklenburg, Marion F. 1991. Some mechanical and physical properties of gilding gesso. *Gilded Wood Conservation and History*.
- ———. 2005. The structure of canvas supported paintings. Paper read at Preprints: Interim Meeting: International Conference on Painting Conservation: Canvases: behaviour, deterioration & treatment.
- Mecklenburg, Marion F, and Charles S Tumosa. 1991. An introduction into the mechanical behavior of paintings under rapid loading conditions. *Art in transit: Studies in the transport of paintings*.
- Mecklenburg, Marion F, Charles S Tumosa, and W David Erhardt. 1998. Structural response of painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity. *Painted wood: history and conservation*.
- Michalski, Stefan. 1991. Paintings: Their response to temperature, relative humidity, shock, and vibration. *Art in transit: Studies in the transport of paintings*: 223–48.
- ———. 1993. Relative humidity: a discussion of correct/incorrect values. *mh* 500 (3): 100.
- ———. 2000. Guidelines for humidity and temperature in Canadian archives.

- ———. 2013. Agent of Deterioration: Incorrect Relative Humidity. Canadian Conservation Institute: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/humidity.html>.
- ———. 2014. The power of history in the analysis of collection risks from climate fluctuations and light. Paper read at Proceedings of the ICOM Committee for Conservation 17th Triennial Meeting, Melbourne, Australia.
- Ohtsuki, Torao. 1990. Studies on Eurotium tonophilum Ohtsuki: Minimum Humidity for Germination and Characterization of Yellow Pigments Produced by this Fungus. *Scientific Papers on Japanese Antiquities and Art Crafts* 35: 28–34.
- Oreszczyn, Tadj, May Cassar, and Keith Fernandez. 1994. Comparative study of air-conditioned and non air-conditioned museums. *Studies in Conservation* 39 (sup2): 144–48.
- Reilly, James M. 1995. *New Tools for Preservation: Assessing Long-Term Environmental Effects on Library and Archives Collections*: ERIC.
- Soboń, Magdalena, and Łukasz Bratasz. 2022. A method for risk of fracture analysis in massive wooden cultural heritage objects due to dynamic environmental variations. *European Journal of Wood and Wood Products* 80 (5): 1201–13.
- Strang, Tom. 2013. Mould risk to cultural property-on the problem of defining adverse environmental conditions and potential for harm. Paper read at Microbial Biodeterioration of cultural property: recent topics on the investigation of and countermeasures for biodeterioration of outdoor/indoor properties and disaster-affected objects: International Symposium on the Conservation and Restoration of Cultural Property (36th: 2012: Tokyo, Japan).
- Strlič, Matija, Carlota M Grossi, Catherine Dillon, Nancy Bell, Kalliopi Fouseki, Peter Brimblecombe, Eva Menart, Kostas Ntanos, William Lindsay, and David Thickett. 2015. Damage function for historic paper. Part III: Isochrones and demography of collections. *Heritage Science* 3: 1–11.
- Strojecki, Marcin, Michał Łukomski, Leszek Krzemień, Joanna Sobczyk, and Łukasz Bratasz. 2014. Acoustic emission monitoring of an eighteenth-century wardrobe to support a strategy for indoor climate management. *Studies in conservation* 59 (4): 225–32.
- Tantideeravit, S, Maria N Charalambides, Daniel S Balint, and Christina RT Young. 2013. Prediction of delamination in multilayer artist paints under low amplitude fatigue loading. *Engineering fracture mechanics* 112: 41–57.
- van Duin, Paul. 2013. What real museum objects can teach us about the influence of climate conditions. *Climate for Collections—Standards and Uncertainties. Climate for Culture. Postprints*: 271–82.
- Waller, Robert. 2013. Temperature-and humidity-sensitive mineralogical and petrological specimens. In *Care and Conservation of Geological Material*, 25–50. Routledge.

3. Wprowadzenie do mikroklimatu

Zbiory dziedzictwa kulturowego, budynki, w których są one ekspozowane i przechowywane, a także warunki klimatyczne typowe dla ich lokalizacji geograficznej dostarczają niemal nieskończonej liczby zmiennych, które należy zebrać, przeanalizować i zinterpretować, aby opracować odpowiednie warunki długoterminowego bezpiecznego przechowywania różnorodnych obiektów. Badania przeprowadzone w ostatnich dekadach dostarczyły nowych informacji na temat sugerowanych parametrów temperatury i wilgotności względnej w celu

zapobiegania procesowi deterioracji obiektów muzealnych i powstawania uszkodzeń. Na podstawie danych uzyskanych przez GCI/Museum Collections Environment i innych (patrz: Aneks I) można obecnie zaproponować szersze zakresy wytycznych środowiskowych dla niektórych typów zbiorów.

Wiele innych materiałów, takich jak obiekty starożytne i archeologiczne (zwłaszcza jeśli są nasycone solami rozpuszczalnymi), metale, materiały złożone i in., może jednak wymagać zawężonych lub specyficznych wartości wilgotności względnej, aby zapobiec aktywacji chemicznych i mechanicznych czynników ich degradacji lub złagodzić już trwającą deteriorację.

Gabloty zapewniające odpowiedni mikroklimat stanowią alternatywę dla bardziej rygorystycznego utrzymywania zadanych parametrów klimatu w całym pomieszczeniu ekspozycyjnym, oferując rozwiązania właściwie dostosowane, bezpieczne i zrównoważone. Istnieją różne podejścia do projektowania i utrzymania gablot mikroklimatycznych, od niedrogich i stosunkowo prostych rozwiązań po najnowocześniejsze gabloty z aktywnymi systemami kształtowania klimatu. Informacje zamieszczone poniżej mają na celu szeroki przegląd opcji i zasobów, które warto wziąć pod uwagę podczas kształtowania mikrośrodowiska dla obiektów o specyficznych wymaganiach.

GABLOTY LUB RAMY MIKROKLIMATYCZNE

- pasywne
- aktywne
- wybór buforów i osuszaczy

MATERIAŁY I PROJEKTOWANIE GABLOT

- różne opcje konstrukcyjne
 - gabloty wolnostojące, gabloty wiszące typu *shadow box*, gabloty ściennie itp.
 - dostęp do komór
 - wymiana powietrza
- bezpieczne materiały do gablot
 - materiały konstrukcyjne
 - farby
 - tkaniny
 - uszczelki

- materiały pochłaniające parę wodną
- testowanie materiałów

MONITORING

- przegląd różnych typów urządzeń pomiarowych

Obszary do dalszych badań

- konieczność intensyfikacji wykonywania testów i zbierania danych
- potrzeba szczegółowych badań nad konkretnymi materiałami oraz ich odpowiedzi na zmiany wilgotności względnej i temperatury (takich jak już zdegradowane materiały archeologiczne, sole, metale, produkty korozji, szkło, materiały złożone, współczesne i syntetyczne materiały, inne).

Literatura i inne źródła

- American Institute for Conservation Wiki. https://www.conservation-wiki.com/wiki/Environmental_Guidelines.
- Canadian Conservation Institute. <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/preventive-conservation/guidelines-collections/metal-objects.html>.
- Hatchfield, Pamela. 2002. Pollutants in the Museum Environment : Practical Strategies for Problem Solving in Design, Exhibition, Storage. London: Archetype Publications.
- Harrison, Lynne. 2018. Variations on a theme: re-evaluating the performance of modified microclimates for the protection of old master paintings. *The Picture Restorer* Spring (52), 23–31.
- Kupczak, Arkadiusz, Mariusz Jędrychowski, Marcin Strojcecki, Leszek Krzemień, Łukasz Bratasz, Michał Łukomski, and Roman Kozłowski. 2018. HERIE: A Web-Based Decision-Supporting Tool for Assessing Risk of Physical Damage Using Various Failure Criteria. *Studies in Conservation* 63, no. S1: 151–55.
- Padfield, Timothy, Borchersen, Karen, Christensen, Mads Chr, and Nationalmuseet. 2007. *Museum Microclimates : Contributions to the Copenhagen Conference 19–23 November 2007*. Edited by Tim Padfield and Karen Borchersen; Scientific Committee Mads Christian Christensen, et al. Copenhagen: National Museum of Denmark.
- Paterakis, Alice Boccia. 2016. *Volatile Organic Compounds and the Conservation of Inorganic Materials*. London: Archetype Publications.
- Paterakis, A. Boccia, M. Mariano, Hyslop. 2013. Oxygen Absorbers and Desiccants in the Protection of Archaeological Iron: Maintaining Some Control. In *Metal 2013 Edinburgh, Scotland 16th – 20th September 2013, Interim Meeting of the ICOM-CC Metal Working Group, Conference Proceedings*, Ewan Hyslop, Vanesa Gonzalez, Lore Troalen, Lyn Wilson, eds. (Edinburgh: Historic Scotland and ICOM-CC), 185–191.
- Schieweck, A., and Krüger, Markus. 2011. *Mitigation Strategies for the Sustainable Improvement of Microclimates within Cultural Heritage Objects and Museum Institutions*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 40–44.

- Shashoua, Yvonne, and Bridgland, Janet. 1999. Ageless Oxygen Absorber: From Theory to Practice. 12th triennial meeting, Lyon, 29 August-3 September 1999: preprints (ICOM Committee for Conservation). London: Earthscan Ltd., 881–887.
- Tétreault, Jean. 1999. Coatings for Display and Storage in Museums. Technical Bulletin (Canadian Conservation Institute), no. 21. Ottawa: Canadian Conservation Institute.
- Tétreault, Jean. 2003. Airborne Pollutants in Museums, Galleries and Archive: Risk Assessment, Control Strategies and Preservation. Ottawa: Canadian Conservation Institute.
- Tétreault, Jean. 2021. Control of Pollutants in Museums and Archives. Technical Bulletin (Canadian Conservation Institute), no. 37. Ottawa: Canadian Conservation Institute.
- Tétreault, Jean. 2022. Airtightness Measurement of Display Cases and Other Enclosures. Technical Bulletin (Canadian Conservation Institute), no. 38. Ottawa: Canadian Conservation Institute.
- Tetreault, Jean, and Paul Bégin. 2018. Silica Gel: Passive Control of Relative Humidity. Technical Bulletin (Canadian Conservation Institute), no. 33. Ottawa: Canadian Conservation Institute.
- Thickett, David, David Saunders, Joyce H Townsend, and Sally Woodcock. 2008. Presentation in Original Contexts via Microclimates. Conservation and Access: Contributions to the London Congress 15–19 September 2008. London: International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, 98–103.
- Johanna C. Thunberg, David E. Watkinson & Nicola J. Emmerson. 2021. Desiccated Microclimates for Heritage Metals: Creation and Management. Studies in Conservation, 66:3, 127–153. DOI: 10.1080/00393630.2020.1799599.

4. Efektywność energetyczna

CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNĄ

- **czynniki pasywne:**
 - orientacja budynku
 - stosunek powierzchni ścian do powierzchni okien
 - przegroda budynku (wartość R)
 - ekspozycja na słońce (maksymalne możliwości fotowoltaiczne)
- **ECM – środki oszczędzania energii** – narzędzia lub dobre praktyki zarządzania, które wdraża się w celu oszczędzania energii, takie jak:
 - minimalizacja wielkości urządzeń mechanicznych
 - energooszczędne urządzenia chłodnicze/pompy – np. beztarciowe, z łożyskami magnetycznymi, bezolejowe, odśrodkowe, z odzyskiem ciepła, ~ 20 stopni $^{\circ}T$
- **VFD – napędy o zmiennej częstotliwości** na wszystkich pompach i silnikach (VFD) pozwalają na działanie pompy lub silnika na najbardziej efektywnym poziomie energetycznym, który pozwala zaspokoić wymagania obciążenia.

- **dobrze izolowane rury CHW¹ i HHW²**
- **optymalizacja wykorzystania naturalnego światła**
- **oświetlenie LED**
- **wyeliminowanie zużycia prądu w nocy, które wynika z działania urządzeń w trybie czuwania**
- **zmiana ustawień regulujących warunki środowiskowe w nocy lub w czasie nieobecności pracowników**
- **magazynowanie energii (używanie akumulatorów lub pomp ciepła)**
- **optymalizacja systemów kontrolnych w celu minimalizacji krotności wymiany powietrza (liczba wymian na godzinę ACH)³** – optymalizacja zgodnie z normami i wymaganiami jakości powietrza, eliminacja nieefektywności związanych z jednoczesnym chłodzeniem/ogrzewaniem, optymalizacja krotności wymiany powietrza między wnętrzem a przestrzenią zewnętrzną.
- **stosowanie najniższej akceptowalnej klasy filtracji powietrza MERV⁴ zgodnej z przepisami i normami obowiązującymi dla używanej przestrzeni** (zmniejszenie oporu na filtrach i obniżenie wymagań dotyczących silników wentylatorów).
- **opracowanie programu redukcji zapotrzebowania na energię** w przypadku małej liczby pracowników/zwiedzających lub przecięcia sieci (np. *blackout*).
- **eliminacja użycia pary** – zastąpienie pary gorącą wodą do ogrzewania lub wysokociśnieniowymi (adiabatycznymi) atomizerami wody do regulacji wilgotności względnej.
- **wykorzystanie analityki BMS⁵ i oprogramowania FDD⁶**
- **CRM⁷:**
 - elektryfikacja sprzętu mechanicznego – zmniejszenie zużycia gazu
 - odnawialne źródła energii na miejscu lub PPA/VPPA⁸
 - podniesienie/obniżenie ustawień urządzeń regulacji klimatu HVAC w celu zmniejszenia zużycia energii
 - alternatywne paliwa, np. ogniwa paliwowe na wodór
 - wykorzystanie czynników chłodniczych o niskim GWP⁹

¹ CHW – chilled water – system chłodzenia budynku w oparciu o wykorzystanie wody lodowej.

² HHW – heating hot water – system ogrzewania budynku, polegający na cyrkulacji ciepłej wody.

³ ACH – air changes per hour – krotność wymiany powietrza na godzinę; zmniejszenie krotności wymiany powietrza przynosi oszczędność energii (przyp. red.).

⁴ MERV – minimum efficiency reporting value – miara stopnia filtracji powietrza; wysoka wartość prowadzi do zwiększenia zużycia energii potrzebnej do wymuszenia przepływu powietrza (klasyfikacja jakości filtracji MERV została zdefiniowana przez ASHRAE natomiast w Polsce i Europie klasyfikacja filtracji powietrza określona jest normą PN-EN ISO 16890-1:2017-01 – przyp. red.).

⁵ BMS – building management system – system zarządzania budynkiem.

⁶ FDD – fault detection diagnostics – narzędzie analityczne, które pozwala na wykrycie błędów w układzie mechanicznym (przyp. red.).

⁷ CRM – carbon reduction measures – działania na rzecz redukcji emisji dwutlenku węgla.

⁸ PPA/VPPA – Power Purchase Agreement/Virtual Power Purchase Agreement – długoterminowe umowy polegające na zakupie energii elektrycznej z Odnawialnych Źródeł Energii bezpośrednio od wytwórcy.

⁹ GWP – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego – wskaźnik oceny ilościowej wpływu danej substancji na efekt cieplarniany.

Wnioski:

1. **Pasywne zarządzanie środowiskiem budynku:** należy prowadzić odpowiednie pomiary energii, aby można było śledzić jej zużycie w cyklach dziennych/tygodniowych/rocznych i powiązać je z konkretnymi obszarami.
2. **Pasywne zarządzanie ze wsparciem dodatkowej instalacji klimatyzacyjnej:** sterowanej nie tylko wypadkową wilgotnością względną i temperaturę w pomieszczeniu, ale również zużyciem energii związanym z poszczególnymi obszarami, by zredukować do minimum pracę instalacji. Stwierdziliśmy, że po przejściu na pasywne zarządzanie środowiskiem opisane w punkcie 1, tradycyjny sposób sterowania instalację klimatyzacyjną szybko uniemożliwia jej pracę zgodną z ustawieniami pasywnej regulacji warunków, a zużycie energii wzrastało, chociaż warunki wilgotności względnej i temperatury były stabilne. Konieczne stało się zrozumienie sposobu działania systemu. Monitorowanie zużycia energii było kluczowe, aby sprawdzić, czy sterowanie instalacją nie odbiegało od normy.

5. Literatura dotycząca regulacji warunków środowiska

- AIC (American Institute for Conservation). 2020. Environmental Guidelines. AIC Wiki: A Collaborative Knowledge Resource. https://www.conservation-wiki.com/wiki/Environmental_Guidelines.
- Dardes, Kathleen, Erica C. Avrami, Marta De la Torre, Samuel Y. Harris, Michael Henry, and Wendy Claire Jessup. 1999. *The Conservation Assessment: A Proposed Model for Evaluating Museum Environmental Management Needs*. Los Angeles, CA: Getty Conservation Institute. https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/evaluating_museum_environmental_mngmnt.html.
- Henderson, Jane. Managing Uncertainty for Preventive Conservation. *Studies in Conservation* 63, no. sup1 (August 2018): 108–12. <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1479936>.
- Maekawa, Shin, Vincent L. Beltran, and Michael C. Henry. *Environmental Management for Collections: Alternative Conservation Strategies for Hot and Humid Climates*. Tools for Conservation. Los Angeles, California: Getty Conservation Institute, 2015.
- Museums, Galleries, Archives and Libraries. 2019 ASHRAE Handbook – HVAC Applications, edited by Heather Kennedy, ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), 2019, p. 1–41. <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>.
- IPI's Guide to: Sustainable Preservation Practices for Managing Storage Environments. Image Permanence Institute, Rochester Institute of Technology, 2012. https://s3.cad.rit.edu/ipi-assets/publications/sustainable_preservation_practices/sustainable_preservation_practices_all.pdf.
- IPI's Methodology for Implementing Sustainable Energy-Saving Strategies in Collections Environments. Image Permanence Institute, Rochester Institute of Technology, 2019. https://s3.cad.rit.edu/ipi-assets/publications/methodology_guidebook/methodology_guidebook_all.pdf.
- Padfield, T, Morten, Ryhl-Svendsen, Larsen, Poul Klensz, and Jensen, Lars Asbjerg. A Review of the Physics and the Building Science which Underpins Methods of Low Energy Storage of Museum and

Archive Collections. *Studies in Conservation* 63, no. sup1 (August 2018): 209–215. <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1481324>.

- Reflections on the Psychological Basis for Suboptimal Environmental Practices in Conservation. *Journal of the Institute of Conservation* 41, no. 1 (January 2, 2018): 32–45. <https://doi.org/10.1080/19455224.2017.1422777>.
- Staniforth, Sarah. Environmental Conditions for the Safeguarding of Collections: Future Trends. *Studies in Conservation* 59, no. 4 (July 2014): 213–17. <https://doi.org/10.1179/2047058414Y.0000000142>.
- Sterrett, Jill, and Roberta Piantavigna. Building an Environmentally Sustainable San Francisco Museum of Modern Art. *Studies in Conservation* 63, no. sup1 (August 2018): 242–50. <https://doi.org/10.1080/00393630.2018.1481324>.

6. Dzielenie się doświadczeniami

6.1 Przykłady

Rijksmuseum,
Amsterdam:

„Od dwóch i pół roku mamy grupę roboczą ds. klimatu, składającą się z inżynierów i konserwatorów. To multidyscyplinarne podejście okazuje się bardzo skuteczne. Cieszymy się, że w końcu rozszerzyliśmy specyfikacje. Poszukujemy również aktywnie sposobów na bardziej efektywne zarządzanie urządzeniami klimatyzacyjnymi. Uważamy, że oba te działania są ważne i powinny iść w parze. Jesteśmy także zaangażowani w badania, takie jak projekt Climate4Wood, który, podobnie jak prace prowadzone przez inne grupy, sugeruje, że większość obiektów może bezpiecznie przetrwać w znacznych wahaniami wilgotności względnej. Ze względu na to, że nasze obiekty są wykonane z wielu połączonych ze sobą różnych materiałów, a stan obiektów może się znacznie różnić, badania zajmują dużo czasu, a wyniki nie zawsze przekonują wszystkich odpowiedzialnych za opiekę nad obiektami. W oczekiwaniu na efekty badań nasza grupa robocza ds. klimatu zdołała uzyskać dla wytycznych Bizot szerokie poparcie personelu muzeum.”

Raport Grupy Roboczej Rijksmuseum ds. Zrównoważonych Warunków Klimatycznych v1 [[tutaj](#)]

6.2. Studia przypadków

a) dotyczące wytycznych Bizot:

- Studium przypadku 1:
Wdrożenie Protokołu i Wytycznych Bizot w NGV (Australia) [[tutaj](#)]

- Studium przypadku 2:
Zrównoważone modele opieki nad zbiorami i działań muzealnych w CSMVS (Indie) [\[tutaj\]](#)
 - Studium przypadku 3:
Wdrożenie „Zielonego Protokołu Bizot” i wytycznych w Rijksmuseum (Holandia) [\[tutaj\]](#)
- b) dotyczące alternatywnych rozwiązań w zakresie regulacji warunków klimatu oraz środków służących efektywności energetycznej
- Studium przypadku 4:
Efektywność energetyczna i regulacja warunków środowiska w Rijksmuseum (Holandia) [\[tutaj\]](#)
 - Studium przypadku 5:
Opracowanie dostosowawczej strategii regulacji warunków klimatu i programu monitorowania mikrozmiian w drewnianych obiektach dziedzictwa kulturowego w NGV (Australia) [\[tutaj\]](#)
 - Studium przypadku 6:
Nocne wyłączanie systemu automatycznego zarządzania budynkiem (BAS) i urządzeń klimatyzacyjnych (HVAC) w NGV (Australia) [\[tutaj\]](#)
 - Studium przypadku 7:
Studium przypadku NGS – Niskoenergetyczny budynek do przechowywania zbiorów w National Galleries of Scotland: National Portrait Gallery (Wielka Brytania) [\[tutaj\]](#)
 - Studium przypadku 8:
Studium przypadku NGS – Opieka nad zbiorami poprzez projekt budynku w National Galleries of Scotland (Wielka Brytania) [\[tutaj\]](#)
 - Studium przypadku 9:
Wykorzystanie ram mikroklimatycznych w Tate (Wielka Brytania) [\[tutaj\]](#)

7. Narzędzia praktyczne

7.1. Sformułowania w umowach użyczenia

Umowa użyczenia – MoMA:

„Wypożyczający będzie utrzymywał stałą i adekwatną ochronę Wypożyczonego Dzieła przed zagrożeniami, takimi jak ogień, kradzież, ekspozycja na ekstremalne lub niszczące światło, skrajne wartości temperatury i wilgotności względnej, owady, brud, manipulacje przez osoby nieupoważnione lub niedoświadczone, czy dotykanie przez zwiedzających. W czasie użyczenia Wypożyczone Dzieło musi być przez cały czas widoczne dla przeszkolonego strażnika ochrony. Systemy ppoż/detekcji pożaru, regulacja temperatury/wilgotności i systemy zabezpieczeń muszą działać 24 godziny na dobę, 7 dni w tygodniu. Zgodnie z wytycznymi ustalonymi na spotkaniu Grupy Bizot w listopadzie 2014 roku Wypożyczone Dzieło należy rozpakowywać, spakować ponownie, tymczasowo

przechowywać i eksponować tylko w przestrzeniach, gdzie temperatura jest utrzymywana na stabilnym poziomie 16–25°C (61–77 stopni Fahrenheita) oraz stabilna wilgotność względna mieści się w zakresie 40–60%. W obrębie tych zakresów temperatura nie może wahać się o więcej niż +/- 4 stopnie Fahrenheita, a wilgotność o nie więcej niż +/- 10% w ciągu 24 godzin. O wszelkich wahanach temperatury lub wilgotności przekraczających powyższe wartości należy niezwłocznie powiadomić Inwentaryzatora MoMA.”

Umowa użyczenia wystawy – MoMA:

„Wystawę należy rozpakowywać, spakować ponownie, tymczasowo przechowywać i eksponować tylko w przestrzeniach, w których średnia temperatura jest utrzymywana na stabilnym poziomie 16–25°C (61–77 stopni Fahrenheita) oraz stabilna wilgotność względna mieści się w przedziale 40–60%. W obrębie tych zakresów temperatura nie może wahać się o więcej niż +/- 4 stopnie Fahrenheita, a wilgotność o więcej niż +/- 10% w ciągu 24 godzin. O wszelkich waniach temperatury lub wilgotności względnej przekraczających powyższe wartości należy niezwłocznie powiadomić Inwentaryzatora MoMA (zgodnie z ustalonymi na spotkaniu Grupy Bizot w listopadzie 2014 roku wytycznymi: *Osiąganie zrównoważonego rozwoju dla galerii i muzeów*).”

Umowa użyczenia – Muzeum Guggenheima

(zapis zmieniany wyłącznie w przypadku niektórych bardziej wrażliwych materiałów):

„Dzieło sztuki należy rozpakowywać, spakować ponownie, tymczasowo przechowywać i eksponować tylko w miejscach, gdzie wilgotność względna jest utrzymywana na stabilnym poziomie mieszczącym się w zakresie 40–60%, z wahaniami nieprzekraczającymi $\pm 10\%$ w ciągu 24 godzin, a temperatura jest stabilna i mieści się w przedziale 16–25°C.”

Umowa użyczenia – Tate:

„**Klimat:** Tate popiera główne postulaty i wytyczne „Zielonego Protokołu” Międzynarodowej Grupy Bizot z 2015 roku.

Kontrola temperatury: Stabilna temperatura w zakresie 16–25°C, 21°C +/- 3.

Wilgotność względna: Zakres 40–60%, 50% z fluktuacją $\pm 10\%$ i maksymalną kumulatywną fluktuacją 10% w ciągu 24 godzin.

Zanieczyszczenia atmosferyczne: Dzieła sztuki nie powinny być narażone na stężenia dwutlenku siarki przekraczające dziesięć mikrogramów na metr sześcienny, tlenków azotu przekraczających dziesięć mikrogramów na metr sześcienny lub ozonu przekraczającego dwa mikrogramy na metr sześcienny. W obszarach o dużym zanieczyszczeniu należy podjąć aktywne środki w celu wykluczenia lub zredukowania poziomów zanieczyszczeń gazowych. Wymagany jest wysoki stopień filtracji kurzu, jeśli stosowany jest system wentylacji mechanicznej.

Ogólne: Dzieło sztuki nie należy umieszczać w bliskim sąsiedztwie źródeł ciepła, zimna oraz silnych prądów powietrza (grzejniki, kominki, osuszacze, wyloty powietrza z urządzeń klimatyzacyjnych lub wloty powietrza do tych urządzeń).”

7.2. Oświadczenia dotyczące zagrożeń klimatycznych

W ostatnim czasie część organizacji działających w obszarze kultury opublikowała deklaracje dotyczące zagrożenia klimatycznego, np. w Holandii, Belgii, Niemczech i w Wielkiej Brytanii przygotowano następujące dokumenty:

- *Klimaatverklaring voor erfgoedorganisaties / Climate declaration for heritage institutions* – Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed [\[tutaj\]](#)
- *Energiekrise: Museumsbund empfiehlt neue Richtlinien für die Museumsklimatisierung* – Deutscher Museumsbund e.V. [\[tutaj\]](#)
- *Tate Directors declare climate emergency* (komunikat prasowy) [\[tutaj\]](#) oraz *Tackling the Climate Emergency* – Tate Museum [\[tutaj\]](#)

W grudniu 2022 roku KiCulture zorganizowało konferencję klimatyczną i sformułowało treść oświadczenia, w którym wzywa muzea do zobowiązania się do zmiany warunków klimatu oraz zapisów w umowach użyczenia przyjmowanych przez poszczególne instytucje (*Getting Climate Control Under Control Declaration* [\[tutaj\]](#)).

7.3. Metoda wdrażania zrównoważonych strategii oszczędzania energii w środowisku, w którym przechowywane są zbiory

W IPI (Image Permanence Institute) opracowano przydatny przewodnik, który pomaga we wdrażaniu strategii zrównoważonego oszczędzania energii w środowisku muzealnym. Przewodnik *IPI's Methodology for: Implementing Sustainable Energy-saving Strategies in collections environments* dostępny jest online [\[tutaj\]](#).

7.4. Regulacja lokalnych warunków środowiskowych na poziomie obiektu

Działanie	Ekspozycja	Magazyn	Transport	Komentarz
Szczelne ramy z zapleckami od strony odwrocia i szkłem od strony lica znacząco ograniczają wahania wilgotności względnej oraz w mniejszym stopniu wahania temperatury	Tak	Tak	Tak	Wspiera złagodzenie rygorystycznych wymogów, zwiększenie dopuszczalnych wahań związane z porami roku oraz elastyczność w zakresie sterowania urządzeniami opartego na minimalizacji zużywanej energii
Szczelne owijanie obiektów folią wykonaną z ekologicznego plastiku (wilgotność względna)	Nie	Tak (ten sposób zabezpieczenia utrudnia organizację magazynu otwartego)	Tak (w skrzyni lub poza skrzynią)	

Użycie szczelnych i oszklo- nych gablot wiszących typu shadow-box do ekspozycji dzieł sztuki	Tak	Tak	Tak	Zapewniają również ochronę ram podatnych na uszkodzenia
Dodanie materiałów buforu- jących wewnątrz ram różnego rodzaju	Tak	Tak	Tak	Wymaga monitorowania
Gabloty wystawowe z regula- cją warunków klimatu	Tak	Nie	Tak/Nie	Dają szeroki zakres możli- wości w zakresie lokalnej regulacji warunków

Zarządzanie warunkami klimatycznymi w budynkach w sposób pasywny

Zapewnienie odpowiedniego pomiaru zużycia energii jest kluczowe, aby móc je monitorować na poziomie dobowym, tygodniowym i rocznym oraz umożliwić powiązanie zużycia z konkretnymi obszarami.

Zarządzanie pasywne ze wsparciem dodatkowej instalacji klimatyzacyjnej

Sterowanie instalacją nie jak zwykle przez wypadkową wilgotność względną i temperaturę w pomieszczeniu, ale także przez zużycie energii związane z poszczególnymi obszarami, by zredukować do minimum pracę tej instalacji. Stwierdziliśmy, że po przejściu na pasywne zarządzanie środowiskiem opisane w punkcie 1., tradycyjny sposób sterowania instalacją klimatyzacyjną szybko uniemożliwiał jej pracę zgodną z ustawieniami pasywnej regulacji warunków, a zużycie energii wzrastało, chociaż warunki wilgotności względnej i temperatury były stabilne. Była to potrzebna lekcja. Analiza zużycia energii okazała się niezbędna, aby sprawdzić, czy sterowanie instalacją nie zawiodło.

7.5. Plan działania na rzecz dekarbonizacji dla organizacji non-profit i instytucji

GCC opublikowało w marcu 2023 roku nowe narzędzie, które ma na celu wsparcie instytucji i organizacji non-profit w opracowaniu planu działania na rzecz dekarbonizacji. Dokument *Decarbonisation action plan for non-profits and institutions* jest dostępny online [\[tutaj\]](#).