

Zagrożenia mikrobiologiczne zbiorów muzealnych

Magdalena Dyda

Zagrożenia mikrobiologiczne zbiorów muzealnych

13 2020

Spis treści

Wstęp	3
Biodeterioracja	4
Mikrobiologiczne czynniki biodeterioracji	7
Wpływ mikroklimatu na aktywność mikroorganizmów	14
Skażenie mykologiczne budynków	20
Zanieczyszczenie powietrza	26
Analizy zanieczyszczenia mikrobiologicznego powierzchni	50
Eliminacja mikroorganizmów	72
Zagrożenia dla zdrowia pracowników instytucji kultury ze strony mikroorganizmów	81
Zabezpieczenia przed szkodliwym oddziaływaniem mikroorganizmów na zdrowie człowieka	87
Podsumowanie	91
O autorce	92

Wstęp

Opracowanie *Zagrożenia mikrobiologiczne zbiorów muzealnych* jest podsumowaniem warsztatów, które organizuje Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów we współpracy z Wydziałem Biologii Uniwersytetu Warszawskiego. Z roku na rok, wraz z pracownikami obu instytucji, modyfikujemy tematy szkoleń i uwzględniamy w nich zagadnienia, które spotkały się z największym zainteresowaniem uczestników.

W prezentowanym, trzynastym tomie serii *Szkolenia Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów*, tak jak we wspólnych z NIMOZ warsztatach, główny nacisk położyłam na zagadnienia praktyczne. Znajdą tu Państwo informacje o obowiązujących normach, rozporządzeniach, wskazaniach oraz tzw. dobre praktyki. Na łamach poszczególnych rozdziałów poruszyłam kwestie prewencji, opisałam metody zwalczania mikroorganizmów stosowane w ochronie zbiorów i ważki aspekt ochrony zdrowia pracowników instytucji kultury przed szkodliwym oddziaływaniem mikroorganizmów. Każdy z przybliżanych tematów został szerzej opisany w cytowanej literaturze, do której lektury odsyłam Czytelników spragnionych wiedzy nie tylko o zagadnieniach „mikro”.

W publikacji wykorzystałam również własne doświadczenia z ostatnich pięciu lat pracy zawodowej związanej z badaniami mikrobiologicznymi i fizykochemicznymi, jakie miałam możliwość przeprowadzić w muzeach, bibliotekach, archiwach czy w opuszczonych, zabytkowych budynkach na terenie kraju.

Mam nadzieję, że to syntetyczne opracowanie głównych zagadnień związanych z „życiem utajonym” pomoże Państwu w opiece nad dziedzictwem kulturowym i historycznym.

Magdalena Dyda

Biodeterioracja

Prawidłowa opieka nad dziełami sztuki wymaga interdyscyplinarnego podejścia w trakcie zabiegów konserwatorskich czy restauratorskich. Wymusza to specyfika zbiorów, ich różnorodność materiałowa, pochodzenie i czas powstania oraz niejednakowy stopień podatności na destrukcję. Ponieważ niewielki odsetek zbiorów jest eksponowany (od kilku do kilkunastu procent zgromadzonej kolekcji), prewencja dotyczy w głównej mierze obiektów zgromadzonych w pomieszczeniach magazynowych¹. Warto w tym miejscu podkreślić, że podstawowym parametrem, który wpływa na wydłużenie czasu zachowania obiektu w niezmienionym stanie, jest temperatura. Przyjmuje się, że niezależnie od rodzaju materiału, obniżenie temperatury przechowywania z 25°C do 0°C, przy wilgotności względnej powietrza około 50%, wydłuża „czas życia materiału” około 40-krotnie^{2, 3}. Z kolei wzrost wilgotności względnej powietrza, a tym samym wilgotności materiałów, sprzyja aktywności i rozwojowi mikroorganizmów osadzonych na powierzchniach, co stanowi przyczynę niszczenia obiektów w procesie biodeterioracji. „Biodeterioracja” to termin, który funkcjonuje w literaturze od ponad pół wieku i definiowany jest jako „każda niepożądana zmiana właściwości materiału spowodowana aktywnością życiową organizmów”⁴ (Ryc. 1–4). Czynniki biologiczne, takie jak bakterie, algi, grzyby, porosty, mchy i rośliny, mogą kolonizować różne podłoża (papier, drewno, kamień, freski, obrazy itp.) oraz uszkadzać zarówno powierzchnie, jak i głębokie warstwy obiektów.

Ryzyka związane z biodeterioracją są – obok kataklizmów, działań wojennych, pożarów, włamań i kradzieży czy zagrożeń fizycznych – istotnym czynnikiem wpływającym na bezpieczeństwo

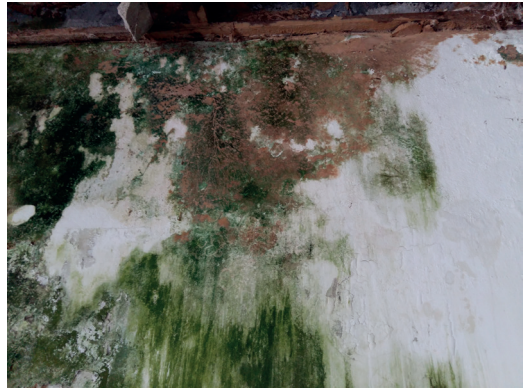
¹ J. Czop, *Centralny magazyn zbiorów muzealnych – nowe zadanie Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów*, „Muzealnictwo” 2019, nr 60, s. 92–102, DOI: 10.5604/01.3001.0013.2614.

² Tamże.

³ S. Michalski, *Agent of Deterioration: Incorrect Temperature*, <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/temperature.html> (dostęp: grudzień 2019 – tu i przy pozostałych źródłach internetowych).

⁴ H.J. Hueck, *The Biodeterioration of Materials as Part of Hylobiology*, „Material und Organismen” 1965, nr 1, s. 5–34, uuid:cd2e06b7-2a61-4685-96b9-08a490c6e2c0; Tenże, *The Biodeterioration of Materials – An Appraisal* [w:] A.H. Walters, J.S. Elphick (red.), *Biodeterioration of Materials*, Elsevier, London 1968, s. 6–12.

Ryc. 1. Biodeterioracja ściany wewnętrznej w zabytkowym budynku. Powłoki malarskie zasiedlone przez mszaki, glony i grzyby strzępkowe. Fot. M. Dyda



Ryc. 2. (A) Słomiana strzecha porośnięta mszakami. (B) Korozja biologiczna drewnianych i metalowych elementów kiaratu. Na kole zębatym widoczny wzrost glonów. Fot. M. Dyda



objektów muzealnych⁵. Tempo i przebieg procesów biodeterioracji, w tym niszczenia obiektów zabytkowych, zależą od:

- rodzaju czynnika niszczącego (zwierzęta, stawonogi, rośliny, mchy, porosty, glony, grzyby czy bakterie);
- parametrów i specyfiki materiałów, z jakiego wykonano obiekt (materiały organiczne, nieorganiczne, syntetyczne, porowatość i przepuszczalność materiałów);
- warunków ekspozycji czy przechowywania obiektu (w budynku, na zewnątrz, rodzaj wentylacji, wahania parametrów klimatu)^{6, 7}.

⁵ S. Michalski, J.L. Pedersoli, *Metoda zarządzania ryzykiem w obszarze dziedzictwa kulturowego*, https://www.nimoz.pl/files/publications/37/Metoda%20zarzadzania%20ryzykiem_Podrecznik_komputer_wersja%20ostateczna.pdf.

⁶ T. Warscheid, J. Braams, *Biodeterioration of Stone: A Review*, „International Biodeterioration & Biodegradation” 2000, nr 46, s. 343–368, [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(00\)00109-8](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(00)00109-8).

⁷ K. Sterflinger, G. Piñar, *Microbial Deterioration of Cultural Heritage and Works of Art – Tilting at Windmills?*, „Applied Microbiology and Biotechnology” 2013, nr 97, s. 9637–9646, DOI: 10.1007/s00253-013-5283-1.

Ryc. 3. (A, B) Biodeterioracja zabytkowych obiektów kamiennych na wzgórzu Monte Urgull w San Sebastián w północnej Hiszpanii. Fot. M. Dyda



Ryc. 4. Zniszczenia opraw starodruków w wyniku żerowania owadów. Fot. M. Dyda



Mikrobiologiczne czynniki biodeterioracji

Biodeterioracja jest procesem złożonym, zależnym od warunków środowiskowych i właściwości chemiczno-fizycznych podłoża. Zdolność do tworzenia konsorcjów mikrobiologicznych jest zupełnie inna w środowiskach zewnętrznych (rzeźby, ściany zewnętrzne budynków itp.), niż w zamkniętych pomieszczeniach, w których przechowywane są obiekty zabytkowe. Mikroorganizmy, które biorą udział w procesie deterioracji materiałów nieorganicznych (kamień, metal, szkło itp.) i organicznych (papier, drewno, pergamin, skóra, tekstylia itp.) można zaliczyć do dwóch podstawowych grup – autotrofów (źródłem węgla dla tych organizmów jest głównie CO₂) i heterotrofów (wykorzystują związki organiczne jako źródło węgla). W efekcie aktywności mikroorganizmów, poza mechanicznymi uszkodzeniami, dochodzi do chemicznych zmian materiałów, które są zasiedlone. Mikroorganizmy w trakcie swojego wzrostu wydzielają wiele enzymów, substancji zakwaszających, barwników czy węglowodorów, które mogą powodować zmiany kolorystyczne lub/i wytrzymałościowe obiektów. Oprócz wydzielania substancji do podłoża, na którym rosną, bakterie i grzyby mogą emitować do powietrza czynniki niebezpieczne dla zdrowia ludzi – związki toksyczne, rakotwórcze i alergenne. Wzrost mikroorganizmów jest więc szczególnie niebezpieczny w pomieszczeniach zamkniętych. Z kolei na zewnątrz – np. na zabytkach kamiennych – mikroorganizmy, jako organizmy pionierskie, pozwalają na zasiedlanie przestrzeni przez grupy organizmów o wyższych wymaganiach pokarmowych, a tym samym wpływają na tempo niszczenia zabytków (Ryc. 5).

Kolonizacja i wzrost mikroorganizmów na powierzchniach budowli zabytkowych, kamiennych rzeźbach ogrodowych, fasadach budynków i innych zabytkowych podłożach nieorganicznych, są procesem wieloetapowym. Pierwszym etapem jest odwracalne oddziaływanie między organizmami a materiałem. W procesie tym największy udział mają siły grawitacyjne, właściwości materiału (hydrofilowy, hydrofobowy), a także siły van der Waalsa i Debye'a. Po tym etapie następuje nieodwracalne połączenie, obejmujące m.in. wydzielenie przez konsorcjum mikroorganizmów zewnątrzkomórkowych egzopolisacharydów (EPS). Stabilizują one tworzenie biofilmu na zasiedlanej powierzchni i zapewniają ochronę przed niekorzystnym wpływem czynników środowiskowych⁸.

⁸ G. Ranalli, E. Zanardini, C. Sorlini, *Biodeterioration – Including Cultural Heritage* [w:] T.M. Schmidt (red.), *Encyclopedia of Microbiology* (4th Edition), Elsevier, Amsterdam 2019, s. 491–509, DOI: 10.1016/B978-0-12-809633-8.13016-X.

Ryc. 5. Biodeterioracja zabytkowego kamienia. Fragment muru na wzgórzu Monte Urgull w San Sebastián w północnej Hiszpanii. Fot. M. Dyda



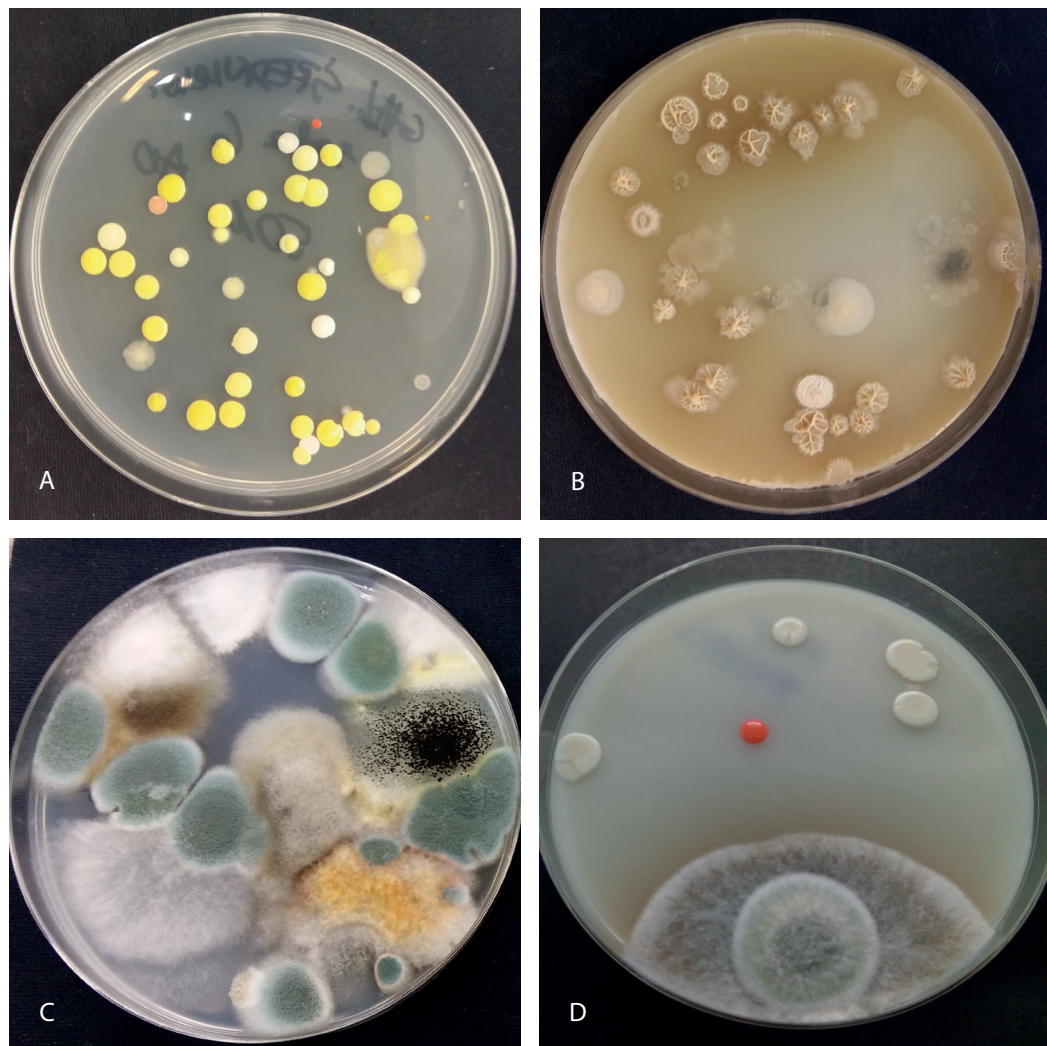
Do niedawna uważano, że pierwszymi kolonizatorami powierzchni kamiennych są organizmy autotroficzne (zarówno fotoautotrofy, jak i chemolitotrofy), a kolonizacja powierzchni przez heterotrofy następuje później, z wykorzystaniem związków organicznych wydzielanych w trakcie procesów metabolicznych przez autotrofy. Wykazano jednak, że istnieje specyficzna mikroflora heterotroficzna, szczególnie w obszarach zanieczyszczonych, zdolna do degradacji organicznych zanieczyszczeń atmosferycznych nagromadzonych na powierzchniach kamiennych. Zanieczyszczenie powietrza może zatem oddziaływać na obiekty kamienne dwojako – powodować uszkodzenia chemiczne warstw powierzchniowych bezpośrednio w procesie degradacji i stanowić źródło pożywienia dla mikroorganizmów⁹. Niektóre z mikroorganizmów zasiedlających obiekty zabytkowe są zdolne do degradacji związków wielopierścieniowych, węglowodorów alifatycznych i aromatycznych, w tym środków stosowanych do zabezpieczania, impregnacji czy konsolidacji powierzchni kamiennych¹⁰.

⁹ Tamże.

¹⁰ D. Pangallo, M. Bučková, L. Krakova, A. Puškárová, N. Saková, T. Grivalský, K. Chovanova, M. Zemánková, *Biodeterioration of Epoxy Resin: A Microbial Survey Through Culture-Independent and Culture-Dependent Approaches*, „Environmental Microbiology” 2015, nr 17, s. 462–479, DOI: 10.1111/1462-2920.12523.

Opisane przykłady dowodzą, że istnieje wiele fizycznych i biochemicznych mechanizmów związanych z biodegradacją podłoża skalnego oraz mineralnego. Badaniem tych mechanizmów i interakcji między mikroorganizmami a zmianami geologicznymi zachodzącymi pod wpływem ich aktywności zajmuje się geomikrobiologia. Zainteresowanych geomikrobiologią odsyłam do publikacji autorstwa prof. Geoffrey'a M. Gadda. Autor w sposób przystępny i zwięzły, uzupełniony przejrzystymi schematami, przedstawił sieć głównych zależności między drobnoustrojami, środowiskiem a podłożem, które zasiedlają¹¹.

Ryc. 6. (A, B) Kolonie bakterii, (C) kolonie grzybów pleśniowych, (D) bakterie i grzyby na szalkach z podłożami mikrobiologicznymi. Mikroorganizmy wyizolowano z próbek pobranych z powierzchni zabytkowych. Fot. M. Dyda



¹¹ G.M. Gadd, *Geomicrobiology of the Built Environment*, „Nature Microbiology” 2017, nr 2, 16275, DOI: 10.1038/nmicriobiol.2016.275.

BAKTERIE

Do podstawowych, najliczniej i najczęściej identyfikowanych grup mikroorganizmów odpowiedzialnych za biodeteriorację (Ryc. 6A, B, D) można zaliczyć^{12, 13}:

■ Bakterie chemolitotroficzne, w tym:

- **bakterie utleniające siarkę** (np. *Thiobacillus* i *Thiomicrospira*) – uważane za jedną z najbardziej niebezpiecznych grup dla zabytków kamiennych, ponieważ w reakcji utleniania siarkowodoru, siarki elementarnej i tiosiarczanów wytwarzają nieorganiczny kwas siarkowy – czy
- **bakterie żelazowe** (są mikroorganizmami, które uzyskują energię z utleniania żelaza Fe^{2+} do żelaza Fe^{3+}), których obecność stwierdzono na zawierających piryt – nadsiarczek żelaza(II) – kamieniach, freskach i malowidłach ściennych.

■ Bakterie heterotroficzne – wydzielające enzymy, które bezpośrednio przyczyniają się do niszczenia zasiedlanej powierzchni, w szczególności materiałów pochodzenia organicznego, lecz również powierzchni kamiennych czy malowideł naściennych. Wśród bakterii heterotroficznych można wyróżnić, w zależności od aktywności enzymatycznych, jakie wykazują:

- **bakterie proteolityczne i amonowe** – bakterie te wytwarzają pozakomórkowe enzymy hydrolityczne (tj. proteazę i peptydazę), które hydrolizują substancje białkowe do peptydów, a peptydy do aminokwasów. Te z kolei są rozkładane wraz z uwolnieniem amoniaku. Najczęściej identyfikowane gatunki bakterii proteolitycznych należą do rodzajów *Pseudomonas*, *Sarcina*, *Bacteroides* i *Streptomyces*. Bakterie proteolityczne są szczególnie niebezpieczne dla materiałów pochodzenia zwierzęcego, takich jak pergamin, skóra, jedwab i wełna;
- **bakterie celulozylityczne oraz fakultatywnie celulozylityczne**. Do bakterii, które nie są w stanie rosnąć, jeśli w środowisku nie ma celulozy, możemy zaliczyć bakterie z rodzajów *Cytophaga*, *Sperocytophaga* i *Sporangium*, podczas gdy fakultatywne bakterie celulozylityczne (są w stanie wykorzystywać również inne związki organiczne) to *Vibrio*, *Cellvibrio* i *Cellfalcicula*;
- **bakterie amylozylityczne** – zdolne do rozkładu skrobi i amylopektyny, głównie z rodzajów *Bacillus* i *Clostridium*;
- **bakterie lipolityczne** – wytwarzają lipazy – specyficzne esterazy, które hydrolizują wiązania estrowe między glicerolem a kwasami tłuszczowymi. Bakterie o takich właściwościach zidentyfikowano wśród rodzajów *Bacillus*, *Alcaligenes*, *Staphylococcus* i *Clostridium*.

Bakterie, chociaż niewątpliwie przyczyniają się do niszczenia materii zabytkowej, znalazły zastosowanie m.in. w biotechnologicznych metodach oczyszczania powierzchni kamiennych

¹² G. Ranalli, E. Zanardini, C. Sorlini, dz. cyt.

¹³ G.M. Gadd, dz. cyt.

z nagromadzonych osadów (tzw. *biocleaning*)¹⁴ oraz do uzupełniania mikroubytków powierzchni kamiennych, dzięki umiejętności wytwarzania węgla wapnia (biocementu)¹⁵.

GRZYBY PLEŚNIOWE

Grzyby pleśniowe (Ryc. 6C, D) są organizmami kosmopolitycznymi występującymi we wszystkich strefach klimatycznych. Rozprzestrzenianie się grzybów pleśniowych ułatwiają zarodniki (spory), które ze względu na swoją budowę mogą być łatwo przenoszone przez wiatr, wodę czy za pośrednictwem zwierząt. W odróżnieniu od bakterii są to organizmy eukariotyczne, heterotroficzne, tlenowe. Większość gatunków to saprobionty rozkładające martwą substancję organiczną, w tym tak złożone związki, jak celuloza, chityna, lignina, wielocząsteczkowe węglowodory aromatyczne, polimery. Niektóre z gatunków to grzyby patogenne dla roślin, zwierząt i ludzi (powodują grzybicę skóry, paznokci, błon śluzowych, zakażenia organów wewnętrznych).

Grzyby odgrywają ważną rolę w procesach niszczenia materii zabytkowej, ze względu na zdolność przystosowywania się do różnych warunków środowiskowych, odporność na działanie rozmaitych czynników chemicznych i fizycznych, takich jak: związki utleniające, promieniowanie UV, gamma i rentgenowskie. Odporność grzybów wynika m.in. z budowy ściany komórkowej (głównym składnikiem jest chityna) i obecności pigmentów (melanina). Melanina jest ciemnym barwnikiem, który ogranicza m.in. efekty oddziaływania szkodliwych czynników fizykochemicznych na komórki grzyba, w tym na promieniowanie jonizujące. Nie jest więc zaskakującym, że w okolicach Czarnobyłskiej Elektrowni Jądrowej (CzEJ), a nawet na elementach grafitowej obudowy reaktora, stwierdzono obecność około 200 gatunków grzybów pleśniowych należących do prawie 100 rodzajów¹⁶. Jak wykazano, niektóre z wyizolowanych grzybów są nie tylko odporne na działanie promieniowania jonizującego, lecz także wykazują ukierunkowany wzrost plechy w kierunku źródła promieniowania zarówno beta, jak i gamma¹⁷. Dzieje się tak w efekcie zmian właściwości melaniny pod wpływem oddziaływania promieniowania¹⁸.

Grzyby mają duże zróżnicowanie metaboliczne i są w stanie rozwijać się nawet w warunkach oligotrofii (niedobór składników odżywczych). Rozwój pleśni powoduje zarówno mechaniczne

¹⁴ I. Soffritti, M. D'Accolti, L. Lanzoni, A. Volta, M. Bisi, S. Mazzacane, E. Caselli, *The Potential Use of Microorganisms as Restorative Agents: An Update*, „Sustainability” 2019, nr 11, s. 3853, <https://doi.org/10.3390/su11143853>.

¹⁵ F. Jroundi, M.T. Gonzalez-Muñoz, A. Garcia-Bueno, C. Rodriguez-Navarro, *Consolidation of Archaeological Gypsum Plaster by Bacterial Biomineralization of Calcium Carbonate*, „Acta Biomaterialia” 2014, nr 10, s. 3844–3854, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.03.007>.

¹⁶ Za: N.N. Zhdanova, T. Tugay, J. Dighton, V. Zheltonozhsky, P. McDermott, *Ionizing Radiation Attracts Soil Fungi*, „Mycological Research” 2004, nr 108, s. 1089–1096, <https://doi.org/10.1017/S0953756204000966>.

¹⁷ Tamże.

¹⁸ E. Dadachova, R.A. Bryan, X. Huang, T. Moadel, A.D. Schweitzer, P. Aisen, J.D. Nosanchuk, A. Casadevall, *Ionizing Radiation Changes the Electronic Properties of Melanin and Enhances the Growth of Melanized Fungi*, „PLoS One” 2007, nr 2(5), e457, DOI: 10.1371/journal.pone.0000457.

uszkodzenia spowodowane penetracją strzępek, jak i degradację chemiczną przez wydzielane do środowiska metabolity – kwasy nieorganiczne, barwniki czy toksyny. Ze względu na aktywność enzymatyczną (celulazy, glukanazy, lakkazy, fenolazy, kolagenazy, keratynazy, monooksygenazy), grzyby są w stanie zasiedlać i rozkładać zarówno materiały zawierające celulozę, jak i obrazy, tkaniny, skóry, pergamin, olej, kazeinę, klej i inne¹⁹.

Destruktywne działania grzybów i bakterii, w przeciwieństwie do aktywności organizmów wyższych, chociaż często są niewidoczne w krótkim okresie obserwacji, to mogą okazać się katastrofalne w skutkach w dłuższej perspektywie. Przykładem postępujących w czasie, nieodwracalnych zmian wywołanych aktywnością mikroorganizmów, są przebarwienia na autoportrecie Leonarda da Vinci. Zmiany kolorystyczne na krawędzi obiektu stwierdzono po raz pierwszy w 1952 roku. Ich liczba wzrosła w latach 1972–1987, kiedy obserwowano okresowe fluktuacje wilgotności względnej powietrza (70–90%) w miejscu przechowywania obiektu. Pierwsze badania mikrobiologiczne z wykorzystaniem metod hodowlanych nie wykazały obecności grzybów pleśniowych na obiekcie. Dopiero badania autoportretu przeprowadzone w 2012 r. przez Guadalupe Piñar i współpracowników²⁰, z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz technik molekularnych, wykazały obecność *Eurotium halophilicum* w miejscach zmienionych kolorystycznie (ang. *foxing*). Ponadto wykazano w tych miejscach obecność szczawianów, co również przemawia za aktywnością grzybów pleśniowych na obiekcie.

To nie jedyny obiekt, przy którym zastosowane nowoczesne techniki pozwoliły na określenie przyczyny powstawania obserwowanych przebarwień. Analizy z wykorzystaniem zaawansowanych technik metagenomicznych (wysokoprzepustowe sekwencjonowanie nowej generacji) oraz metabolomicznych (AuNPET SALDI-ToF-MS – wysokiej rozdzielczości laserowa spektrometria masowa desorpcji/ionizacji czasu przelotu cząsteczki z wykorzystaniem metody AuNPET – ang. *gold nanoparticle enhanced target*) wykazały, że w próbkach XIX-wiecznych obiektów papierowych zmienionych kolorystycznie dominowały sekwencje grzybów z rodzajów *Phoma* sp. i *Cladonia* sp. oraz bakterii *Gluconobacter* i *Ralstonia*. Ponadto potwierdzono w miejscach widocznych zmian kolorystycznych obecność metabolitów mikroorganizmów (w tym barwników) oraz produktów biodegradacji celulozy. Nie stwierdzono natomiast różnic w zawartości jonów metali w miejscach kontrolnych (bez zmian) i w miejscach foxingu. Można zatem przyjąć, że zjawisko foxingu jest wynikiem skumulowanego efektu działania mikroorganizmów oraz zmian chemicznych zachodzących w papierze w wyniku utleniania celulozy²¹.

¹⁹ F. Palla, G. Barresi (red.), *Biotechnology and Conservation of Cultural Heritage*, Springer International Publishing, Switzerland 2017, DOI: 10.1007/978-3-319-46168-7.

²⁰ G. Piñar, H. Tafer, K. Sterflinger, F. Pinzari, *Amid the Possible Causes of a Very Famous Foxing: Molecular and Microscopic Insight Into Leonardo da Vinci's Self-Portrait*, „Environmental Microbiology Reports” 2015, nr 7, s. 849–859, DOI: 10.1111/1758-2229.12313.

²¹ J. Szulc, A. Otlewska, T. Ruman, K. Kubiak, J. Karbowska-Berent, T. Koziellec, B. Gutarowska, *Analysis of Paper Foxing by Newly Available Omics Techniques*, „International Biodeterioration & Biodegradation” 2018, nr 132, s. 157–165, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.005>.

Ryc. 7. (A, B) Obiekty papierowe z widocznymi przebarwieniami (ang. foxing). Fot. M. Dyda



Ryc. 8. (A, B) Obiekty tekstylne (tapiserie) z widocznymi przebarwieniami powstałymi w efekcie aktywności mikroorganizmów. Fot. M. Dyda



Widząc zmiany kolorystyczne na powierzchni obiektu (Ryc. 7A, B, 8A, B), w szczególności takie, które powiększają lub zmieniają się z czasem, „miej się na baczności” (adekwatnie do tytułu publikacji na rycinie 7B). Dla takich obiektów należy wykonać analizy mikrobiologiczne, zapewnić stabilne warunki przechowywania, a nawet poddać dezynfekcji, jeżeli wyniki analiz mikrobiologicznych wykażą, że widoczne na powierzchni zmiany, to efekt obecności mikroorganizmów zdolnych do wzrostu w sprzyjających warunkach.

Wpływ mikroklimatu na aktywność mikroorganizmów

Grzyby pleśniowe i ich formy przetrwalne – zarodniki, a także bakterie – są wszechobecne. W pomieszczeniach muzealnych, archiwalnych i bibliotecznych nie ma możliwości całkowitej eliminacji mikroorganizmów. Źródłem zanieczyszczeń mikrobiologicznych może być powietrze zewnętrzne, system wentylacji, zanieczyszczone mikrobiologicznie obiekty włączane do zbioru, a także pracownicy lub zwiedzający (Ryc. 9). Z biegiem czasu mikroorganizmy i ich formy przetrwalne osadzają się na powierzchniach (Ryc. 10A, B). Zdeponowane w warstwie „kurzu” mikroorganizmy tylko czekają na odpowiednie warunki do wzrostu, czyli sygnał do kolonizacji i rozprzestrzeniania w otaczającym środowisku (Ryc. 11).

Głównym i nieodzownym czynnikiem, który determinuje wzrost i aktywność mikroorganizmów, jest dostępność wody. Tym samym ryzyko i tempo wzrostu mikroorganizmów na powierzchniach są bezpośrednio skorelowane z zawartością wody w podłożu, na którym się znajdują. Z kolei zawartość wody w materiale („aktywność wody”) wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności względnej powietrza (ang. *relative humidity* – RH)²². Bakterie wymagają do wzrostu wyższej wilgotności niż pleśń. Większość bakterii wymaga do wzrostu wilgotności na poziomie 90%. Ryzyko kolonizacji obiektów przez bakterie wzrasta dla powierzchni zanieczyszczonych bogatą w składniki odżywcze glebą, wodą stojącą, fragmentami roślin i zwierząt czy ściekami. Stabilizacja warunków klimatycznych nie jest wystarczającym zabiegiem zapobiegawczym dla takich powierzchni, ponieważ zarówno bakterie, jak i ich toksyny są nadal obecne w skażonym materiale. Rozpoczynając prace z obiektami silnie zanieczyszczonymi organicznie, należy brać pod uwagę ryzyko zatrucia toksynami czy zakażenia bakteryjne. Do najgroźniejszych bakteryjnych czynników etiologicznych możemy zaliczyć np. laseczkę wąglika (*Bacillus anthracis*), laseczkę jadu kiełbasianego (*Clostridium botulinum*), laseczkę tężca (*Clostridium tetani*) czy pałeczki *Legionella pneumophila* powodujące legionellozę (choroba legionistów). Przy pracy ze skażonym materiałem, aby zapobiec infekcji lub zatruciu, trzeba bezwzględnie stosować skuteczne środki ochrony osobistej.

²² Chapter 2B: Humidity and Conservation [w:] D. Camuffo (red.), *Microclimate for Cultural Heritage: Conservation, Restoration, and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments* (2nd Edition), Elsevier, San Diego 2014, s. 77–115, <https://doi.org/10.1016/C2013-0-00676-7>.

Ryc. 9. Zainfekowane mykologicznie książki. Wprowadzenie takich obiektów do magazynu powoduje ryzyko zakażenia całego zbioru. Fot. M. Dyda



Ryc. 10. Rzeźba kamienna (*Pietà*) z nagromadzonymi osadami kurzu oraz zabrudzeniami na postaci Jezusa (A) i Maryi (B). Fot. M. Dyda



Ryc. 11. Wzrost grzybów pleśniowych na książkach i metalowych półkach [!] Efekt wysokiej wilgotności i nagromadzonych zanieczyszczeń. Fot. M. Dyda



Wzrost grzybów pleśniowych w mniejszym stopniu jest ograniczany przez brak wody niż wzrost bakterii. Zarodniki większości gatunków grzybów pleśniowych wymagają wilgoci do rozpoczęcia kiełkowania oraz utrzymującej się aktywności wody w podłożu, aby kontynuować wzrost. Najbardziej narażone na infekcje mykologiczne są materiały organiczne: celulozowe oraz pochodzenia zwierzęcego (tkaniny, skóry). Dość dobrze kolonizowane są materiały porowate, na których osadzają się zanieczyszczenia oraz zarodniki, a także powierzchnie nieorganiczne zanieczyszczone substancjami pochodzenia organicznego. Wzrost pleśni można zahamować, obniżając aktywność wody w podłożu. Nie można jednak zahamować zmian materiału powodowanych przez wydzielone w trakcie wzrostu substancje. Tak jak bakterie, również grzyby mogą wywoływać choroby (np. grzybice skórne czy płuc). Mogą też stanowić czynnik rozwoju alergii skórnych lub oddechowych u osób długotrwale narażonych na bezpośredni kontakt ze strzępkami i zarodnikami pleśni czy toksynami wydzielanymi do podłoża i powietrza w trakcie wzrostu mikroorganizmów. Prace z obiektami zanieczyszczonymi zarodnikami lub strzępkami pleśni (nawet po dezynfekcji) należy zawsze wykonywać, stosując środki ochrony osobistej.

Optymalne wartości warunków mikroklimatu dla przechowywania obiektów muzealnych zostały zawarte w normie PN-EN 15757:2012²³, a dla materiałów archiwalnych i bibliotecznych w normie PN-ISO 11799:2006²⁴. Zgodnie z PN-ISO 11799:2006:

zaleca się, aby w magazynach materiałów archiwalnych i bibliotecznych utrzymywana była niska temperatura, [...] Wilgotność względna w magazynach materiałów archiwalnych i bibliotecznych powinna być utrzymywana poniżej poziomu, przy którym uaktywniają się mikroorganizmy. Zgodnie z obecnym stanem wiedzy, powyżej 60% wilgotności względnej rośnie ryzyko wzrostu mikroorganizmów, a w warunkach bardzo niskiej wilgotności względnej wzrasta kruchość materiałów. Najniższa dopuszczalna wilgotność powietrza dla długoterminowego przechowywania materiałów archiwalnych i bibliotecznych jest obecnie przedmiotem dyskusji. [...] Ustalono, że trwałość materiałów wzrasta w niższych temperaturach i wilgotności względnej. Zaleca się unikanie gwałtownych wahań temperatury i wilgotności względnej, gdyż wywołują one napięcia w materiałach archiwalnych i bibliotecznych, w praktyce celem powinno być zarówno utrzymanie stałej temperatury, jak i stałej wilgotności. Powinno się stosować urządzenia monitorujące temperaturę i wilgotność względną. Najlepiej, aby były to urządzenia rejestrujące warunki klimatyczne w różnym czasie i porach roku. Zaleca się takie umieszczenie czujników, aby dawały odczyty reprezentatywne dla danego pomieszczenia magazynowego (unikając ścian zewnętrznych, urządzeń grzewczych czy wentylacyjnych). Urządzenia rejestrujące wilgotność i temperaturę powinny być regularnie kalibrowane zgodnie z zaleceniami producenta.

Określone w rozporządzeniach, sugerowane parametry są spójne z warunkami mikroklimatu, ograniczającymi aktywność pleśni. Przyjmuje się, że wartością krytyczną, przy której może dochodzić do kiełkowania zarodników pleśni kserofilnych, jest wilgotność względna powietrza na

²³ PN-EN 15757:2012 *Konserwacja dóbr kultury. Wymagania dotyczące temperatury i wilgotności względnej w ograniczaniu mechanicznych uszkodzeń organicznych materiałów higroskopijnych powodowanych oddziaływaniem klimatu.*

²⁴ PN-ISO 11799:2006 *Informacja i dokumentacja. Wymagania dotyczące warunków przechowywania materiałów archiwalnych i bibliotecznych.*

poziomie 60–70%. Im wyższa wartość RH, przy określonej wartości temperatury, tym szybsze tempo wzrostu mikroorganizmów i biodeterioracji materiałów, szczególnie materiałów organicznych. Efekt działania wysokiej wilgotności względnej powietrza na obiekty zabytkowe można obejrzeć (film poklatkowy) na stronie internetowej Kanadyjskiego Instytutu Konserwacji²⁵.

Na podstawie badań eksperymentalnych powstały modele predykcyjne (Schemat 1A, B, 2, 3) przewidujące tempo kiełkowania i wzrostu pleśni w zależności od parametrów klimatu²⁶, potencjału chorobotwórczego pleśni²⁷ czy typu zasiedlanych materiałów budowlanych²⁸. W przedstawionych modelach aktywność bakterii jest pomijana, ponieważ ich tempo wzrostu jest wolniejsze, przyrost biomasy dużo niższy, a wymagane do wzrostu parametry wilgotności podłoża dużo wyższe niż w przypadku pleśni²⁹. Choć (jak wszędzie) i tu istnieją wyjątki – optimum dla wzrostu bakterii *Serratia marcesens* czy *Staphylococcus* znajduje się przy wilgotności poniżej 40%³⁰.

Ryzyko infekcji mikrobiologicznych obiektów wzrasta przy obecności wody na powierzchni, np. w wyniku kondensacji pary wodnej. Do kondensacji pary zachodzi przy nagłych wahaniami temperatury. Dlatego obiekty powinny być odpowiednio aklimatyzowane, np. przy przenoszeniu z magazynu „zimnego”, lodówki czy zamrażarki, do pomieszczenia, w którym panuje temperatura pokojowa. Dodatkowym zabezpieczeniem może być umieszczenie obiektu w hermetycznym opakowaniu, aby ograniczyć do minimum ilość wchłanianej i oddawanej wilgoci³¹. Takie zabezpieczenie mogą stanowić torebki czy folie odporne na wilgoć. W szczelnych opakowaniach zewnętrznych obiekty będą bezpieczne nawet w przypadku nagłej awarii zamrażarki czy w pomieszczeniach silnie zanieczyszczonych. Długotrwałe przechowywanie obiektów w szczelnych, wilgocioodpornych opakowaniach jest możliwe, o ile nie będzie występował któryś z czterech warunków sprzyjających rozwojowi pleśni³². Trzeba zatem pamiętać, że nie należy:

- umieszczać w szczelnych opakowaniach tych obiektów, których wilgotność odpowiada ekwiwalentowi 65% RH (wilgotność umożliwiająca wzrost pleśni);
- umieszczać w szczelnych opakowaniach obiektów, których wilgotność zbliża się do ekwiwalentu 65% RH, a następnie będą przechowywane w wyższej temperaturze. Różnica temperatur spowoduje parowanie wody i jej skroplenie na powierzchni (warunki sprzyjające wzrostowi pleśni);

²⁵ <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/video-parchment-iron-key.html>.

²⁶ S. Michalski, *Agent...*, dz. cyt.

²⁷ K. Sedlbauer, *Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation*, „Journal of Building Physics” 2002, nr 25, s. 321–336, DOI: 10.1177/0075424202025004093.

²⁸ Tenże, *Prediction of Mould Fngus Formation on the Surface of and Inside Building Components*, Ph.D. dissertation, Fraunhofer Institute for Building Physics, University of Stuttgart 2001.

²⁹ T. Strang, R. Kigawa, *Agent of Deterioration: Pests*, <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/pests.html#pest-parasites2a>.

³⁰ *Biological Particles in Indoor Environments, Report No. 12: Indoor Air Quality and its Impact on Man*, Commission of European Communities, Brussels–Luxembourg 1993.

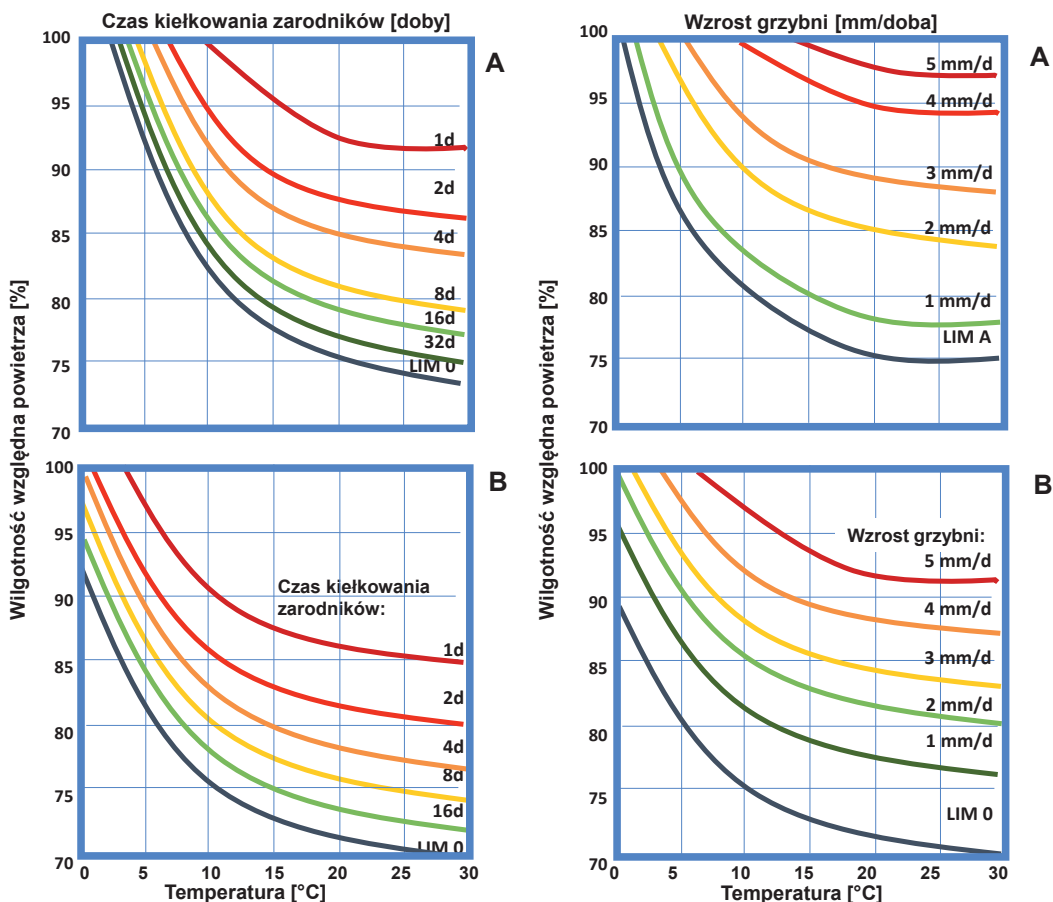
³¹ PN-ISO 11799:2006..., dz. cyt.

³² T. Strang, R. Kigawa, *Agent...*, dz. cyt.

- przechowywać zapakowanych obiektów na powierzchniach zimnych lub gorących, aby zapobiegać indukcji gradientu termicznego (np. zimna betonowa podłoga w ogrzewanej wiacie);
- przechowywać szczelnie zapakowanych obiektów o wilgotności materiału zbliżającej się do poziomu 65% RH w pomieszczeniach, w których panuje dużo wyższa wilgotność względna powietrza przez dłuższy czas.

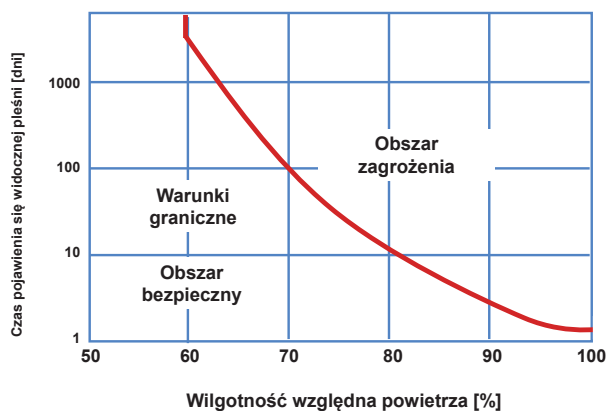
Schemat 1. Izotermi czasu kiełkowania i tempa wzrostu grzybni w zależności od temperatury i wilgotności względnej powietrza dla (A) pleśni patogennych lub pleśni których produkty przemiany materii są uznawane za silnie chorobotwórcze oraz (B) pleśni, które przy długotrwałym narażeniu mogą powodować objawy chorobowe. Schemat zaproponowany przez Klause Sedlbauera³³. Tłum. M. Dyda

LIM (ang. *Lowest Isoleth for Mould*) – najniższa izoterma dla pleśni – najniższa zależna od temperatury wilgotność względna powietrza, przy której nie obserwuje się aktywności grzybów pleśniowych (kiełkowanie lub wzrost grzybni)



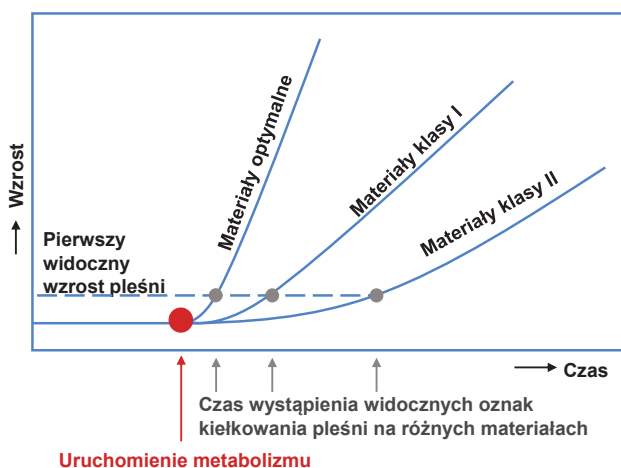
³³ K. Sedlbauer, *Prediction of Mould Fungus Formation on the Surface of and Inside Building Components*, Fraunhofer Institute for Building Physics, s. 212, 213, https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/en/documents/ks_dissertation_etcm1021-30729.pdf.

Schemat 2. Czas potrzebny na pojawienie się widocznej formy grzybów pleśniowych na powierzchni. Schemat zaproponowany przez Stefana Michalskiego³⁴. Tłum. M. Dyda



Schemat 3. Tempo wzrostu pleśni w czasie, w zależności od rodzaju materiału budowlanego. Schemat zaproponowany przez Klausa Sedlbauera³⁵. Tłum. M. Dyda

Materiały optymalne – podłoża pełne, organiczne; materiały klasy I – biodegradowalne: tapety, płyty kartonowo-gipsowe, niektóre materiały izolacyjne; materiały klasy II – o porowatej strukturze: tynki, mineralne materiały budowlane; materiały klasy III – trudno ulegające biodegradacji, nie zawierające organicznych składników odżywczych (nie uwzględnione na schemacie)



Ważne jest również, aby w szczelnych opakowaniach umieszczać obiekty o potwierdzonej czystości mikrobiologicznej, po dezynfekcji, której skuteczność dowiedziono badaniami mikrobiologicznymi. Im mniej zdeponowanych na powierzchni obiektu zarodników pleśni, tym mniejsze prawdopodobieństwo, że dojdzie do infekcji mykologicznej.

³⁴ S. Michalski, *Agent of Deterioration: Incorrect Relative Humidity*, <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/humidity.html>.

³⁵ K. Sedlbauer, *Prediction of Mould Fungus...*, dz. cyt., s. 217.

Skazenie mykologiczne budynków

Grzyby pleśniowe efektywnie zasiedlają również organiczne i nieorganiczne materiały budowlane. Podatność na zasiedlanie zależy m.in. od sorpcyjności danego materiału budowlanego. Najczęściej wzrost pleśni stwierdza się na wilgotnych powłokach malarskich, tapetach i tynkach. Przyczyną zawilgocenia są wady techniczne (nieszczelna izolacja przeciwwilgociowa ścian i fundamentów, nieszczelne pokrycia dachowe, nieszczelne rury i instalacje, wadliwe ocieplenie, ograniczona cyrkulacja powietrza, wilgotne materiały budowlane) oraz niewłaściwa eksploatacja pomieszczeń (niedostateczne przewietrzanie, uszczelnianie okien i kratki wentylacyjnych, dostarczanie dużej ilości pary wodnej). Źródłem zanieczyszczenia mykologicznego jest zazwyczaj powietrze zewnętrzne, zainfekowany materiał budowlany czy system wentylacji³⁶.

Nie ma obecnie statystyk odzwierciedlających rzeczywisty stan mikrobiologiczny budynków, w których ekspozowane lub przechowywane są zbiory zabytkowe, archiwalne czy biblioteczne. Szacuje się, że w 1998 r. infekcje mykologiczne dotyczyły około 25% pomieszczeń mieszkalnych w Polsce³⁷, wśród których wysoki udział miały budynki nowe oraz remontowane. Szczególnie podatne na zasiedlanie są materiały zawierające składniki organiczne (drewno, tapety, płyty kartonowo-gipsowe), w mniejszym stopniu materiały nieorganiczne (zaprawa, beton, gips) czy polimerowe (styropian, wełna mineralna, wykładziny). W trakcie wzrostu pleśni na materiałach budowlanych dochodzi do wydzielania wielu metabolitów przez grzyby oraz do zanieczyszczenia powietrza zarodnikami. W efekcie u mieszkańców zainfekowanych budynków występują objawy alergiczne oraz tzw. Zespół Chorego Budynku (ang. *Sick Building Syndrome* – SBS). Obserwacje takie dotyczą mieszkań, w których liczebności zarodników pleśni przekraczały 500 jtk/m³ (stężenie ergosterolu powyżej 2 µg/m³)³⁸. Warto podkreślić, że wyizolowane z materiałów budowlanych grzyby pleśniowe są zdolne do wytwarzania mykotoksyn (aflatoksyny B1, G1, sterigmatocystyny, roquefortyny C, meleagriny i inne). Wzrost pleśni oraz wytwarzanie związków toksycznych i alergennych są tym silniejsze, im wyższa jest wilgotność podłoża oraz

³⁶ B. Gutarowska, *Grzyby...*, dz. cyt.

³⁷ B. Zyska, 1999, za: B. Gutarowska, *Grzyby...*, dz. cyt.

³⁸ B. Gutarowska, *Grzyby...*, dz. cyt.

im więcej materii organicznej (np. kurz) znajduje się na powierzchni. Białka alergenne są wydzielane m.in. przez pleśnie: *Penicillium expansum*, *Alternaria alternata*, *Penicillium chrysogenum*, *Cladosporium cladosporioides*, *Aspergillus flavus* i *Aspergillus niger*, a profil wydzielanych przez pleśnie białek zależy od materiału, jaki zasiedlają³⁹.

Podobnie jak budynki mieszkalne, również budynki użyteczności publicznej ulegają skażeniom. Na zdjęciach (Ryc. 12A–C, 13, 14A, B) przedstawiłam przykładowe infekcje mykologiczne w instytucjach kultury, które odwiedziłam w ostatnich latach. Zaznaczam jednak, że nie są to odosobnione przypadki i posiadam obszerny katalog podobnych zdjęć.

Ryc. 12. (A) Zawilgocenie przegród budowlanych we wstępnym etapie infekcji mykologicznej; przyczyna: nieszczęsne pokrycie dachowe w okolicy świetlika. (B) Intensywny wzrost pleśni na wilgotnych powłokach malarskich w sali ekspozycyjnej na poddaszu po remoncie; przyczyna: m.in. niedostateczne ocieplenie ściany zewnętrznej oraz ograniczona cyrkulacja powietrza spowodowana wymianą stolarki okiennej. (C) Pleśń na powłokach malarskich w magazynie, w pomieszczeniu piwnicznym; przyczyna: niedostateczna izolacja pionowa i pozioma fundamentów budynku. Fot. M. Dyda



³⁹ Tamże.

Ryc. 13. Wzrost pleśni na parapecie w sali ekspozycyjnej na poddaszu muzeum; przyczyna: remont z wymianą stolarki okiennej. Fot. M. Dyda



Ryc. 14. (A) Wzrost gnilicy mózgowej (*Coniophora puteana*) na betonowej posadzce; przyczyna: wprowadzenie do magazynu w piwnicy zainfekowanych palet i wysoka wilgotność w pomieszczeniu. (B) Wzrost grzybów pleśniowych w bibliotece; przyczyna: półki wykonane z niedosuszonego, niezabezpieczonego drewna w magazynie na poddaszu. Fot. M. Dyda



Wyjątkowo częste są infekcje mykologiczne, które następują po wymianie oryginalnej stolarki okiennej na ramy PCV (Ryc. 14A, B). Przyczyną jest ograniczenie cyrkulacji powietrza, która była w pewnym stopniu zapewniona przez nieszczelności w oryginalnych ramach. Z powodu ograniczenia wentylacji w pomieszczeniu mogą pojawiać się tzw. strefy martwe powietrza. W strefach martwych nie dochodzi do ruchu powietrza, a proces ochładzania, jak i ogrzewania powietrza nie jest tak wydajny, jak być powinien. W efekcie może dochodzić do skraplania się wody na powierzchniach, w tym powierzchniach obiektów.

Przykładem takiej sytuacji jest infekcja mykologiczna w jednym z Muzeów Narodowych⁴⁰. Pomimo monitoringu parametrów klimatu w pomieszczeniu, regularnych przeglądów kolekcji i kontroli czystości mikrobiologicznej powietrza, po wymianie okien w Magazynie Malarstwa doszło do „katastrofy mikrobiologicznej”. Czujnik w magazynie umieszczony był w jego części centralnej, infekcji uległy natomiast obrazy zlokalizowane na kratkach w narożniku pomieszczenia. W tym miejscu doszło do lokalnego wzrostu wilgotności powietrza i powierzchni, a w efekcie do wzrostu pleśni.

Czy można zatem uniknąć takich lokalnych katastrof mikrobiologicznych? Wydaje się, że dobrym rozwiązaniem przy wszelkich remontach jest wykonanie badań wilgotności powłok malarских i murów specjalnym wilgotnościomierzem lub z wykorzystaniem kamery wykonującej zdjęcia w podczerwieni (kamery termowizyjnej). Takie analizy pozwalają wytypować miejsca w pomieszczeniu, w których istnieje podwyższone ryzyko zawiłogocenia zbiorów.

Niemniej ważna jest odpowiednia cyrkulacja powietrza i wydajność wymiany powietrza w budynku. Rozwiązaniem jest również zastosowanie wskazówek zawartych w normie PN-ISO 11799:2006⁴¹. Zgodnie z normą: „System wentylacyjny magazynu powinien zapewnić swobodną cyrkulację powietrza w całym pomieszczeniu i nie dopuścić do tworzenia kieszeni o wysokiej wilgotności względnej” i dalej „Zaleca się zwrócenie szczególnej uwagi na wentylację wokół i wewnątrz systemu regałów. Pomiędzy podłogą a najniżej położoną półką, jak również pomiędzy sufitem a obiektami ułożonymi na najwyższych półkach, powinno się pozostawić odległość co najmniej 150 mm. Pomiędzy krawędzią największego dokumentu na każdej półce, a półką znajdującą się powyżej należy pozostawić co najmniej odstęp 50 mm. Przejścia i przestrzenie pomiędzy regałami również ułatwiają wentylację” oraz „Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie zasad bezwładności klimatycznej nie należy umieszczać mebli ani innych przedmiotów bezpośrednio przy ścianach zewnętrznych. Zaleca się zachowanie przynajmniej 200 mm odległości pomiędzy wszystkimi obiektami a ścianą”. Do wystąpienia infekcji mykologicznej przyczyniają się również niewłaściwe materiały wykorzystane do przygotowania wystawy czy wyposażenia magazynu, jak np. niedosuszone czy zainfekowane mykologicznie drewno (Ryc. 13). I tutaj znowu przychodzi z pomocą cytowana norma, zgodnie z którą: „Umeblowanie i wyposażenie powinno być wykonane z niepalnych materiałów, nieemitujących, przyciągających, ani zatrzymujących kurzu”⁴².

Jednym z głównych czynników zwiększających ryzyko dla zbiorów jest lokalizacja budynków z przeznaczeniem magazynowym i ekspozycyjnym. Do takich lokalizacji można zaliczyć m.in. tereny „zagrożone tąpnięciem gruntu lub powodzią” czy „położone w obszarach szczególnie

⁴⁰ VI Naukowa Konferencja Konserwatorów Papieru i Skóry *Zabytki – Biologia – Konserwacja. Teoria a praktyka*, 18–19 października 2018 r., Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.

⁴¹ PN-ISO 11799:2006..., dz. cyt.

⁴² Tamże.

zanieczyszczonych⁴³. Kolejny aspekt to gromadzenie, przechowywanie i udostępnianie zbiorów w pomieszczeniach zlokalizowanych na najwyższej kondygnacji oraz w pomieszczeniach poniżej poziomu gruntu. To właśnie w takich lokalizacjach najczęściej dochodzi do zalania zbiorów, co potwierdzają doświadczenia m.in. Biblioteki Narodowej (BN). Usługi osuszania oraz dezynfekcji zbiorów (dostępne w BN), które uległy zalaniu, w 90% przypadków dotyczyły zbiorów przechowywanych w pomieszczeniach zlokalizowanych poniżej poziomu gruntu lub na poddaszach⁴⁴.

Ryzyko zalań i zawilgoceń dla pomieszczeń piwnicznych i poddaszy nie zależy od wielkości, czy prestiżu danej instytucji, rodzaju przechowywanych zbiorów, czasu powstania budynku czy przeprowadzonych prac remontowych. Zdjęcia (Ryc. 12A–C, 13, 14A, B) przedstawiają infekcje w budynkach oddanych do użytku w 2013 r. (Ryc. 12A), w budynku z lat 80. XIX stulecia, po remoncie (Ryc. 12B, 13), jak i w budynkach wybudowanych w okresie powojennym (Ryc. 12C, 14A, B).

Aby zapobiec ryzyku utraty kolekcji, wszystkie zbiory powinny być przechowywane w pomieszczeniach powyżej poziomu gruntu i nie na najwyższej kondygnacji. Najlepszym rozwiązaniem jest umieszczenie zbiorów w części centralnej i „obudowanie” magazynów czy ekspozycji pomieszczeniami biurowymi, pracowniami konserwatorskimi, pomieszczeniami edukacyjnymi. Należy również unikać dużych, przeszklonych powierzchni zewnętrznych. W ten sposób uzyskujemy wewnątrz budynku strefę, w której warunki klimatu są stabilne, w której nie dochodzi do nagłych, dużych skoków temperatury czy wilgotności.

Jednym z przykładów może być pięciokondygnacyjny budynek archiwum zaprojektowany dla największej francuskiej spółki energetycznej EDF (Électricité de France), 2 km od miejscowości Bure. Budynek ma prostą, nowoczesną bryłę i fasadę, zmieniającą się wraz z otaczającą przyrodą i porami roku (zmianom nie ulegają oczywiście przechowywane wewnątrz obiekty). Archiwum posiada system odzysku wody oraz ogrzewanie geotermalne, co znacznie obniża koszty eksploatacji budynku. Jest to obiekt energooszczędny i przede wszystkim zapewnia stałe warunki mikroklimatu (niezależnie od pory roku) dla zbiorów umieszczonych na 70 km regałów. Wybudowany został w 3 lata (oddany do użytku w 2011 r.), a jego koszt wyniósł 10,1 mln € bez VAT⁴⁵. Projekt obejrzeć można na stronie internetowej biura projektowego LAN⁴⁶. Okazuje się zatem, że da się zaprojektować i wybudować budynek bez piwnic, który spełnia wszelkie wymogi dla długotrwałego przechowywania zbiorów, nie generując horrendalnych kosztów eksploatacji.

⁴³ Tamże.

⁴⁴ Informacja otrzymana podczas szkolenia „Kontrola mikrobiologiczna zbiorów bibliotecznych i archiwalnych”, Biblioteka Narodowa.

⁴⁵ <https://www.dezeen.com/2011/05/05/edf-archives-centre-by-lan-architecture/>.

⁴⁶ <https://www.lan-paris.com/en/projects/bure>.

Wszystkie ryzyka, w tym ryzyko zalania czy aktywności mikroorganizmów, zależą tylko i wyłącznie od podejmowanych w danej instytucji decyzji. Gros błędów podnoszących ryzyko dla zbiorów popełnianych jest już na etapie wyboru lokalizacji pod budowę budynku dedykowanego magazynowaniu lub ekspozycji obiektów zabytkowych. Kolejne ryzyka to etap projektu budynku, przebudowy czy remontu pomieszczeń magazynowych i ekspozycyjnych, który często nie uwzględnia dialogu z konserwatorami zabytków. Warto w tym miejscu podkreślić istotę dobrej komunikacji i współpracy przy podejmowaniu tak kluczowych dla dobra kolekcji decyzji pomiędzy pracownikami poszczególnych działów w danej instytucji.

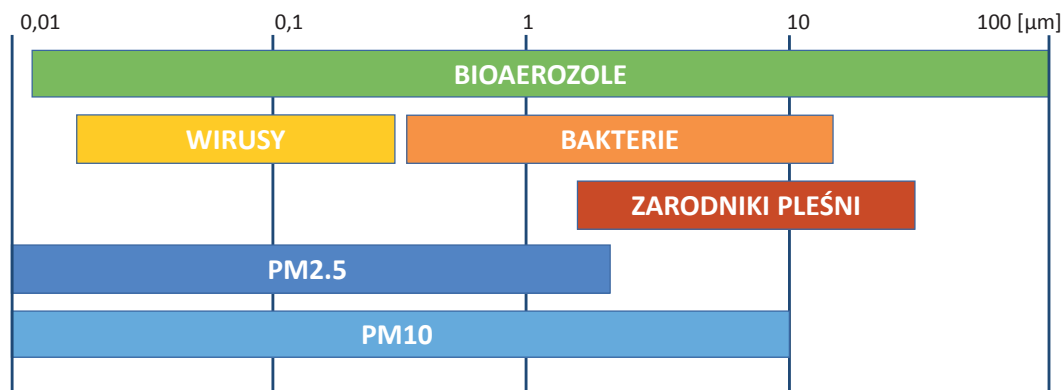
Podsumowując rozdział poświęcony budynkom, wszystkie decyzje dotyczące zarówno budowy, remontu, jak i wyposażenia pomieszczeń dedykowanych dla przechowywania i udostępniania zbiorów powinny:

- ograniczać ryzyka dla zbiorów (rodzaj wykorzystywanych materiałów, normy);
- każdorazowo zostać poprzedzone szerokimi konsultacjami eksperckimi, z udziałem konserwatorów dzieł sztuki i obiektów zabytkowych (ważne są: rozwiązania ułatwiające przemieszczanie obiektów wielkogabarytowych, pomieszczenia kwarantanny);
- mieć podstawy merytoryczne, a nie tylko wizerunkowe (priorytetem nie jest bryła budynku, a bezpieczeństwo zbiorów);
- brać pod uwagę niskie koszty długotrwałej eksploatacji (odzysk wody, ogrzewanie geotermalne) i nie generować zbędnych kosztów (np. koszt systemu wentylacji w pomieszczeniach poniżej poziomu gruntu);
- być podejmowane z zachowaniem zdrowego rozsądku.

Zanieczyszczenie powietrza

Zanieczyszczenie powietrza bezpośrednio lub pośrednio może wpływać na stan zachowania materii zabytkowej. Cząsteczki zawieszane w powietrzu (ang. *Particulate Matter* – PM) stanowią zróżnicowaną grupę cząsteczek pochodzenia nieorganicznego i organicznego, do których zaliczamy m.in. bioaerozole (cząsteczki pochodzenia biologicznego). W skład bioaerozoli wchodzi: wirusy, żywe i martwe komórki bakterii, grzybów, roślin, formy przetrwalne bakterii i grzybów pleśniowych, pyłki, algi, fragmenty komórek. Bioaerozole, pomimo że stanowią niewielką część wszystkich cząsteczek w powietrzu, są szczególnie niebezpieczne dla zdrowia ludzi (wirusy, bakterie, alergeny, zarodniki pleśni). Są to cząsteczki o wielkości od 0,001 μm (fragmenty komórek) do 100 μm (mikroalgi). Cząsteczki biologiczne znajdują się więc we wszystkich frakcjach pyłów zawieszonych w powietrzu – od PM1 (o średnicy ziaren poniżej 1 μm) po PM100 (o średnicy ziaren do 100 μm) (Schemat 4)⁴⁷.

Schemat 4. Rozmiary cząsteczek bioaerozoli w odniesieniu do najczęściej analizowanych cząsteczek zawieszonych w powietrzu (ang. *Particulate Matter* – PM). Schemat zaproponowany przez Jacoba Löndahla⁴⁸. Tłum. M. Dyda



⁴⁷ J. Löndahl, *Physical and Biological Properties of Bioaerosols* [w:] P. Jonsson, G. Olofsson, T. Tjärnhage (red.), *Bioaerosol Detection Technologies. Integrated Analytical Systems*, Springer, New York 2014, s. 33–48.

⁴⁸ Tamże.

ZANIECZYSZCZENIE FIZYKOCHEMICZNE POWIETRZA

Zanieczyszczenie powietrza jest jednym z głównych problemów w dużych aglomeracjach miejskich, ze względu na przemysł i wzmożony ruch komunikacyjny, a w efekcie powstawanie smogu fotochemicznego. W okresie grzewczym natomiast zarówno polskie aglomeracje, jak i mniejsze miejscowości (w których gros zabudowy stanowią budynki jednorodzinne), zmagają się ze zjawiskiem smogu londyńskiego (w efekcie spalania węgla). Obecnie na terenie całego kraju, w szczególności w dużych miastach, Główny Inspektorat Ochrony Środowiska prowadzi monitoring jakości powietrza. Analizy wykonywane są w stacjach pomiarowych (w większości lokalizacji w trybie ciągłym) i obejmują pomiary stężenia dwutlenków siarki i azotu, ozonu, benzenu oraz PM2.5 i PM10 w powietrzu na zewnątrz⁴⁹.

W wytycznych International Council on Archives (ICA) dotyczących ekspozycji obiektów archiwalnych znajdziemy zalecenia dotyczące skażenia powietrza w warunkach klimatu umiarkowanego. Zgodnie ze wskazaniem, aby określić ilość substancji szkodliwych w powietrzu, można stosować zasadę Pareto „80/20”. Zakłada ona, że określamy prawdopodobny poziom skażenia 80% zanieczyszczeń rzeczywiście występujących w muzeach, bibliotekach i archiwach, prowadząc monitoring 20% najbardziej istotnych zanieczyszczeń powietrza. Do tych najważniejszych komitet ICA zalicza: kwas octowy, siarkowodór, dwutlenek azotu, ozon, pył, dwutlenek siarki oraz parę wodną⁵⁰. Inne zanieczyszczenia znajdujące się w powietrzu, które niszczą zbiory, to: amoniak, dwutlenek węgla, formaldehyd, tlen, lotne związki organiczne.

Para wodna (H₂O) jest we wspomnianych wytycznych uznawana za jedno z głównych zanieczyszczeń powietrza. Obecnie istnieją wytyczne dotyczące poziomów wilgotności względnej powietrza w archiwach, bibliotekach i muzeach, mające na celu zapobieganie fizycznemu pogorszeniu jakości materiałów, spowodowanemu przez jej niewłaściwy poziom lub nadmierne wahania. Para wodna może powodować uszkodzenia materiałów na bazie celulozy (papier, drewno, tkaniny). Szczególnie wrażliwe na wilgoć są obiekty wykonane z octanu i azotanu celulozy (taśmy filmowe, arkusze) oraz papiery i taśmy magnetyczne na bazie poliuretanu, fotografie żelatynowe, kleje naturalne czy elastyczne PVC. Para wodna przyspiesza korozję metali, wysolenia. Zawartość pary wodnej przekłada się również na stopień aktywności mikroorganizmów zdeponowanych na powierzchniach i ich możliwość zasiedlania obiektu (zob. rozdział „Wpływ mikroklimatu na aktywność mikroorganizmów”).

Kwas octowy (CH₃COOH) może być uwalniany z farb, lakierów, klejów na bazie poliocetanu winylu, klejów podłogowych, silikonów utwardzanych kwasem octowym, drewna (zwłaszcza

⁴⁹ Aktualne i archiwalne dane są dostępne na stronie internetowej: <http://powietrze.gios.gov.pl/pjp/home>.

⁵⁰ Y. De Lusenet, S. Lunn, A. Miachas (red.), *Guidelines on Exhibiting. Archival Materials Compiled by the ICA Committee on Preservation of Archives in Temperate Climates* (CPTe 2002–2006), https://www.ica.org/sites/default/files/CPTe_2006_guideline_exhibition_EN.pdf.

dębu i cedru), z niektórych środków czyszczących i w wyniku metabolizmu człowieka. Kwas octowy niszczy m.in. obiekty wykonane z ołowiu.

Siarkowodor (H_2S) to gaz o obniżonej zawartości siarki z charakterystycznym zapachem zgniłych jaj. Powoduje matowienie srebra i miedzi, korozję brązu, przyczynia się do przyciemniania pigmentów bieli ołowiowej na obrazach czy odbarwienia fotografii wykonanych techniką srebrową. Stężenie gazu jest wyższe w pomieszczeniach, w których jednocześnie przebywa dużo osób.

Dwutlenek azotu (NO_2) to najczęściej występujący związek z grupy tlenków azotu (NO_x) w atmosferze. Od początku epoki przemysłowej emisja NO_x znacznie wzrosła. Tlenki azotu przenikają do budynków z zewnątrz, a dwutlenek azotu może być dalej utleniany do postaci kwasowej: kwasu azotowego (HNO_3). Oba związki powodują blaknięcie barwników, mogą przyczyniać się do degradacji papieru i garbowanych skór, obiektów wykonanych z azotanu celulozy (taśmy filmowe, grzebienie, szczoteczki do zębów) oraz korozji metali szlachetnych i półszlachetnych.

Ozon (O_3) to silny utleniacz, silnie reaktywna forma tlenu. Stężenie ozonu wzrasta w powietrzu w efekcie smogu fotochemicznego (kalifornijskiego) występującego przy natężonym ruchu komunikacyjnym i wysokim nasłonecznieniu. Wewnątrz budynków głównymi źródłami ozonu są: filtry elektrostatyczne w systemie ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji (HVAC), generatory ozonu, lampy UV, oczyszczacze powietrza z modułem UV lub zimną plazmą czy fotokopiarki. Ozon powoduje przyspieszone starzenie papieru i innych obiektów pochodzenia organicznego, przyspiesza korozję metali szlachetnych i półszlachetnych, przyspiesza uwalnianie formaldehydu z materiałów, powoduje odbarwienie pigmentów i barwników oraz jest szkodliwy dla ludzi.

Dwutlenek siarki (SO_2) to gaz emitowany do powietrza głównie w efekcie spalania paliw lub węgla (przemysł, elektrownie i transport). W połączeniu z wodą dwutlenek siarki powoduje powstanie kwasów siarkawego i siarkowego, które w postaci opadów atmosferycznych (kwaśne deszcze) rozpuszczają wapień i cement. Kwaśne deszcze przyczyniły się do destrukcji zabytków kamiennych, szczególnie na obszarach uprzemysłowionych. Regulacje emisji SO_2 pozwoliły na obniżenie skali zjawiska, niemniej jednak wiele pomników, budynków czy detali architektonicznych zostało poważnie uszkodzonych. Dwutlenek siarki przyczynia się również do zakwaszania papieru, korozji metali szlachetnych i półszlachetnych, odbarwienia barwników czy osłabianiu wytrzymałości obiektów skórzanych.

Formaldehyd (CH_2O) to związek chemiczny, który wpływa niszcząco na obiekty wapienne, w szczególności w obecności kwasów karboksylowych. Podobnie jak w przypadku ozonu, jego stężenie wzrasta w powietrzu w efekcie smogu fotochemicznego (kalifornijskiego), a sam ozon jest jednym z czynników powodujących przyspieszone uwalnianie formaldehydu z różnych materiałów. Źródłem formaldehydu mogą być elementy wykończenia wnętrz, jak wykładziny dywanowe, meble wykonane z płyt wiórowych zawierających kleje oparte na żywicach

zawierających formaldehyd, a także farby, lakiery, środki grzybobójcze, dym tytoniowy i inne. Formaldehyd może redukować jony srebra do srebra koloidalnego i powodować odbarwienie fotografii. Jest szkodliwy dla zdrowia.

Na wspomnianych już stronach internetowych Kanadyjskiego Instytutu Konserwacji można znaleźć wskazania, które określają maksymalne, dopuszczalne poziomy zanieczyszczenia powietrza wewnątrz budynków wymienionymi związkami chemicznymi, które są wymagane dla długotrwałego, bezpiecznego przechowywania zbiorów⁵¹. Podobne zalecenia znajdziemy w normie PN-ISO 11799:2006 (obecnie obowiązuje norma ISO 11799:2015, która nie jest jeszcze dostępna w Polsce, stan na sierpień 2020) opracowanej dla instytucji archiwalnych i bibliotecznych⁵². Dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń powietrza z przytoczonych źródeł zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wskazania dotyczące poziomów zanieczyszczenia powietrza bezpiecznego dla długotrwałego przechowywania zbiorów

Zalecenia dotyczące poziomów zanieczyszczeń powietrza (Kanadyjski Instytut Konserwacji)				Dopuszczalne stężenia zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego (PN-ISO 11799:2006)		
Główne zanieczyszczenia powietrza	Maksymalne średnie stężenie [µg/m ³ (ppb)] dla określonych celów zachowania obiektów*			Rodzaj zanieczyszczeń powietrza	Maksymalne dopuszczalne stężenie	
	1 rok	10 lat	100 lat		ppb	µg/m ³
Kwas octowy	1000 (400)	100	100	Kwas octowy**	<4 (0,004 ppm)	–
Siarkowodór	1 (0,71)	0,1	0,01	Formaldehyd**	<4 (0,004 ppm)	–
Dwutlenek azotu	10 (5,2)	1	0,1	Tlenki azotu (NO_x)	od 5 do 10	–
Ozon	10 (5,0)	1	0,1	Ozon	od 5 do 10	–
Dwutlenek siarki	10 (3,8)	1	0,1	Dwutlenek siarki	od 5 do 10	–
PM2.5	10	1	0,1	Cząsteczki kurzu włącznie ze sporamii pleśni***	–	50

ppb (ang. *parts per billion*) – liczba cząsteczek na miliard

* Cele zachowania obiektu na przestrzeni lat. Jest to okres, w którym obiekty mogą być poddane narażeniu na dane stężenie zanieczyszczeń przy minimalnym ryzyku deterioracji (najniższa dawka, przy której po podanym czasie ekspozycji pojawią się pierwsze oznaki deterioracji).

** Z doświadczeń Narodowego Archiwum USA.

*** Dopuszczalne stężenie cząsteczek kurzu zakłada usuwanie przez system filtracyjny od 60% do 80% cząsteczek większych niż 0,5 µm.

Źródło: J. Tétreault, *Agent of Deterioration: Pollutants*, <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/pollutants.html#pollu3>; PN-ISO 11799:2006 *Informacja i dokumentacja. Wymagania dotyczące warunków przechowywania materiałów archiwalnych i bibliotecznych*.

⁵¹ J. Tétreault, *Agent of Deterioration: Pollutants*, <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration/pollutants.html#pollu3>.

⁵² PN-ISO 11799:2006... dz. cyt.

Osiągnięcie poziomów zanieczyszczenia chemicznego powietrza, które zapewniłyby 100-letni okres bezpieczeństwa dla większości przechowywanych obiektów (Tabela 1) jest trudne nawet dla wiodących instytucji muzealnych czy bibliotecznych. Szczególnie ciężko jest zachować odpowiednie poziomy zanieczyszczeń w instytucjach, które zlokalizowane są w dużych miastach (smog fotochemiczny – kalifornijski).

Okresowy monitoring stężeń nieorganicznych i organicznych związków chemicznych wykonuje się np. metodą spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (ang. *Fourier Transform Infrared* – FTIR). Na podstawie analiz składu chemicznego powietrza można ustalić, w których pomieszczeniach istnieje wysokie ryzyko „deterioracji chemicznej”, lub co jest źródłem zanieczyszczenia chemicznego powietrza. W kolejnym etapie należy wprowadzić działania mające na celu redukcję poziomów zanieczyszczeń (systematyczne przeglądy systemu HVAC, w szczególności kontrola filtrów, instalacja oczyszczaczy powietrza z filtrem węglowym, wymiana wyposażenia czy materiałów wykończeniowych). Pomimo że są to działania dość kosztowne i czasochłonne, nie należy z nich rezygnować w imię priorytetowego zadania instytucji muzealnych, jakim jest trwała ochrona dóbr kultury.

Kolejnym czynnikiem wpływającym negatywnie na zachowanie substancji zabytkowej są **pyły zawieszone w powietrzu** (również wymienione w wytycznych International Council on Archives dotyczących ekspozycji obiektów archiwalnych⁵³). Pyły zawieszone w powietrzu dzieli się na frakcje w zależności od wielkości średnicy cząsteczki. Mniejsze frakcje cząsteczek zawieszonych w powietrzu (PM) obejmują nie tylko składniki bioaerozolu (wirusy, bakterie), lecz także związki organiczne czy sole. To właśnie te mniejsze frakcje PM stanowią największe ryzyko szczególnie dla zdrowia ludzi. Ze względu na mniejszą średnicę, cząsteczki PM_{2.5} (i mniejsze) mogą wnikać głębiej w drogi oddechowe człowieka, a nawet przenikać do krwiobiegu, prowadząc do wielu schorzeń. Większe frakcje PM są mniej szkodliwe dla zdrowia, lecz zawierają zarodniki pleśni, które osadzają się na powierzchniach i przy odpowiednich dla wzrostu warunkach stanowią realne zagrożenie dla zachowania obiektów. W Polsce zanieczyszczenie pyłowe powietrza jest szczególnie wysokie w okresie grzewczym (smog londyński).

Wyniki pomiarów chwilowych stężenia pyłów zawieszonych w powietrzu frakcji PM_{2.5} i PM₁₀, które przeprowadziliśmy w jednej ze stołecznych instytucji muzealnych, zamieściłam w tabeli 3. Otrzymane wyniki odniosłam do Polskiego Indeksu Jakości Powietrza (Tabela 2)⁵⁴.

⁵³ Y. De Lusenet, S. Lunn, A. Miachaś (red.), *Guidelines...*, dz. cyt.

⁵⁴ *Polski Indeks Jakości Powietrza*. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/show/1001737>.

Tabela 2. Indeks Jakości Powietrza na podstawie Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 8 października 2019 r. w sprawie poziomów niektórych substancji w powietrzu (Dz.U. 2019, poz. 1931)

Indeks Jakości Powietrza	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	PM2.5	PM10
Bardzo dobry	0–13	0–20
Dobry	13,1–35	20,1–50
Umiarkowany	35,1–55	50,1–80
Dostateczny	55,1–75	80,1–110
Zły	75,1–110	110,1–150
Bardzo zły	>110	>150

Źródło: *Polski Indeks Jakości Powietrza*. Główny Inspektorat Ochrony Środowiska, <https://powietrze.gios.gov.pl/pjp/content/show/1001737>.

Tabela 3. Wyniki pomiarów stężenia pyłów zawieszonych w powietrzu frakcji PM2.5 i PM10 w salach muzealnych o różnym przeznaczeniu i na zewnątrz

Sale muzealne	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	PM2.5	PM10
Hol w Muzeum	85	162
Gabinet przy holu	151	321
Sala 1	39	52
Sala 2	28	29
Sala 3	28	29
Sala 4	29	30
Sala 5	31	36
Pracownia Konserwacji – prace	458	480
Pracownia Konserwacji – prace	360	386
Pracownia Konserwacji	57	72
Pracownia Konserwacji – prace	271	384
Pracownia Konserwacji – prace	92	121
Powietrze na zewnątrz	38	41

Źródło: M. Dyda, *Zanieczyszczenie powietrza w instytucjach muzealnych i archiwalnych w Polsce* (prezentacja), XV Konferencja Naukowa *Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce*, 27–28 listopada 2019 r., Politechnika Warszawska.

Przeprowadzone analizy wykazały (Tabela 3), że stężenia pyłów zawieszonych są najwyższe w pracowniach konserwatorskich (podczas prac konserwatorskich) oraz w pierwszych salach na trasie dla zwiedzających (w trakcie czynności porządkowych). Wyniki analiz pokazały, jak wysokie jest narażenie konserwatorów dzieł sztuki na wdychanie szkodliwych pyłów (w tym bioaerozoli) w trakcie prowadzonych prac. Podobne wyniki otrzymaliśmy w trakcie 2-letniego projektu prowadzonego w Zamku Królewskim na Wawelu. Tu również najwyższe stężenia PM obserwowaliśmy w pierwszych salach przy wejściu, a także w pracowniach konserwatorskich i salach zlokalizowanych na głównej trasie zwiedzania⁵⁵. Aby poprawić jakość powietrza i ograniczyć przenikanie zanieczyszczeń pyłowych do wnętrza budynku, w wytypowanych lokalizacjach zainstalowano oczyszczacze powietrza. Badania porównawcze jakości powietrza w tych pomieszczeniach wykazały skuteczność podjętych działań⁵⁶.

Muszę tu jednak zaznaczyć, że przytoczone wyniki pochodzą z muzeów, które w momencie wykonywanych analiz posiadały wentylację grawitacyjną. Badania, które wykonywaliśmy w ramach projektu w instytucjach muzealnych i archiwalnych na terenie aglomeracji warszawskiej wykazały, że w instytucjach posiadających sprawny system HVAC (ang. *heating, ventilating, air-conditioning* – system grzewczy, wentylacyjny i klimatyzacyjny), stężenia PM były na poziomach wielokrotnie niższych, niż poziomy zanieczyszczenia pyłowego powietrza na zewnątrz instytucji, nawet w okresie grzewczym⁵⁷.

Podsumowując, głównym źródłem zanieczyszczeń chemicznych powietrza w pomieszczeniach, w których eksponowane lub przechowywane są zbiory, są nie tylko powietrze zewnętrzne, nieodpowiednie materiały wykończeniowe czy elementy wyposażenia wnętrz, lecz także czynności porządkowe i natężenie ruchu turystycznego (liczba zwiedzających).

DOBRE PRAKTYKI – ZANIECZYSZCZENIE FIZYKOCHEMICZNE POWIETRZA

- W nowych budynkach muzealnych, bibliotecznych i archiwalnych ilość przenikających do pomieszczeń zanieczyszczeń ogranicza centralny, sprawny system HVAC wyposażony

⁵⁵ M. Dyda, *Monitoring i ocena zagrożeń deterioracyjnych* [w:] E. Wiłkojć, J. Winiewicz (red.), *Prewencja jako niezbędny element opieki nad zbiorami Zamku Królewskiego na Wawelu. Konserwacja prewencyjna kolekcji Lanckorońskich*, Zamek Królewski na Wawelu, Kraków 2019, s. 68–82.

⁵⁶ Konferencja Naukowa *Prezentacja prac konserwatorskich i działań z zakresu ochrony dzieł sztuki w Zamku Królewskim na Wawelu* w ramach projektu „Wawel – dziedzictwo dla przyszłości”; 12 grudnia 2019 r., Muzeum Zamku Królewskiego na Wawelu, Kraków oraz wystawa czasowa *Madonna w płaszczu opiekuńczym i inne dzieła. Prace konserwatorskie w Zamku Królewskim na Wawelu* w ramach projektu „Wawel – dziedzictwo dla przyszłości”, 10 grudnia 2019 – 16 lutego 2020 r., Zamek Królewski na Wawelu, Kraków.

⁵⁷ M. Dyda, M. Dziurzyński, Ł. Istel, D. Kakietek, A. Laudy, M. Draniak, T. Buźniak, A. Modrzewska, A. Wiercińska, A. Czajka, A. Włodarczyk-Sętopek, *Mikrobiologiczne zanieczyszczenia powietrza, a parametry mikroklimatu w głównych instytucjach muzealnych i archiwalnych w Warszawie* (prezentacja), VI Naukowa Konferencja Konserwatorów Papieru i Skóry Zabytki – *Biologia – Konserwacja. Teoria a praktyka*, 18–19 października 2018 r., Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.

w filtry o różnej konfiguracji. Wydajność systemu jest najwyższa dla specjalistycznych filtrów gazowych i wysoko wydajnych filtrów cząsteczek stałych (przeciwpyłowych). ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) i CEN (European Committee for Standardization) opracowały normy wydajności dla filtrów przeciwpyłowych: normę ASHRAE 52.2-2017⁵⁸ oraz ISO 16890⁵⁹. Przy wyborze filtrów należy pamiętać, że jonizatory powietrza włączone w system HVAC nie są odpowiednie dla archiwów, bibliotek i muzeów, ponieważ w trakcie jonizacji powietrza powstają wolne rodniki oraz szczególnie niebezpieczny dla zbiorów ozon⁶⁰. Przy wyborze systemu HVAC należy zwrócić uwagę na to, aby była możliwość zainstalowania urządzeń pomiarowych sterujących pracą systemu (termohigrometry) na wysokości około 2 m od podłogi lub na wysokości obiektów, jakie znajdują się w pomieszczeniu. Często zdarza się, że systemy HVAC posiadają czujniki temperatury i wilgoci przy wylocie wentylacji (sufit), co w efekcie powoduje, że ciężko jest utrzymać odpowiednie parametry klimatu w pomieszczeniu o dużej kubaturze. Nie należy zatem rezygnować z niezależnego monitoringu temperatury i wilgotności w pomieszczeniach, nawet posiadając w instytucji najbardziej wydajny system HVAC, zarówno na wypadek awarii systemu, jak i na wypadek opisanej sytuacji.

- Aby ograniczyć napływanie zanieczyszczeń powietrza z zewnątrz, w instytucjach posiadających system wentylacji bez wydajnych filtrów, należy dążyć do ograniczenia jego napływania (np. ograniczenie wietrzenia pomieszczeń, główne wejście z dala od parkingów i wysokiego natężenia ruchu pojazdów). Duże znaczenie dla jakości powietrza ma również wybór lokalizacji budynku oraz umiejscowienie czerpni powietrza, jak również systematyczna kontrola i wymiana filtrów w wentylacji.
- Niemniej ważne jest ograniczenie emisji zanieczyszczeń chemicznych wewnątrz pomieszczeń przez eliminację źródła zanieczyszczeń. W tym celu należy dobierać odpowiednie materiały wykończeniowe, elementy wyposażenia pomieszczeń, gabloty oraz środki czystości. Należy umieszczać sorbenty w gablotach ekspozycyjnych, a obiekty ekspozowane poza gablotami – z dala od źródła emisji zanieczyszczeń. Rozwiązaniem może być również ograniczenie liczby zwiedzających.
- Pozostałe wydajne i skuteczne metody ograniczania zanieczyszczeń fizykochemicznych powietrza w budynkach instytucji kultury, to mobilne oczyszczacze powietrza wyposażone w filtry do usuwania cząstek stałych (np. HEPA – ang. *high efficiency particulate air filter*) oraz w filtry węglowe usuwające zanieczyszczenia chemiczne. Przy wyborze oczyszczacza należy wziąć pod uwagę kubaturę pomieszczenia i współczynnik CADR urządzenia (ang. *Clean Air Delivery Rate*), czyli ilość czystego powietrza, jaką dostarcza oczyszczacz wyposażony w filtry w ciągu godziny. CADR oczyszczacza powinien wynosić minimum tyle, ile

⁵⁸ ASHRAE 52.2-2017. Standard 52.2-2017 *Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size* (ANSI Approved).

⁵⁹ PN-EN ISO 16890-1:2017-01. *Przeciwpyłowe filtry powietrza do wentylacji ogólnej. Część 1: Specyfikacje techniczne, wymagania i system klasyfikacji określony na podstawie skuteczności filtracji cząstek pyłu (ePM)*.

⁶⁰ Y. De Lusenet, S. Lunn, A. Miachás (red.), *Guidelines...*, dz. cyt.

wynosi kubatura danego pomieszczenia, a najlepiej 2-krotnie więcej. Wynika to z tego, że CADR podawany jest dla oczyszczaczy pracujących na maksymalnych obrotach, co oczywiście generuje dodatkowe decybele. Wybierając oczyszczacz, należy również zwrócić uwagę na inne istotne parametry, takie jak: głośność, pobór prądu i jakość systemu filtracji. Przy podłączeniu przenośnego urządzenia, należy pamiętać, aby oczyszczacz ustawić minimum kilkadziesiąt centymetrów od ściany (aby nie blokować przepływu powietrza). Różnorodność dostępnych na rynku rozwiązań jest ogromna: oczyszczacze z wbudowanymi modułami do pomiaru stężenia PM w powietrzu, programowane i kontrolowane za pomocą aplikacji, np. na system Android, jednostki naścienne, w tym nawet w formie obrazów, z modułem UV lub zimną plazmą. W muzeach, bibliotekach i archiwach nie jest wskazane instalowanie oczyszczaczy powietrza wyposażonych w lampę UV czy zimną plazmę (jonizator powietrza), ze względu na generowane w trakcie pracy urządzenia wolne rodniki i ozon (związki silnie reaktywne, szkodliwe zarówno dla obiektów, jak i zdrowia ludzi). Oczyszczacze powietrza warto zainstalować w pierwszych salach przy wejściu na trasę dla zwiedzających, w salach najchętniej zwiedzanych, pracowniach konserwatorskich, pomieszczeniach digitalizacji oraz pomieszczeniach, w których pracuje się z zasobem archiwalnym czy bibliotecznym (w tym czytelnie).

- Kolejne działanie prewencyjne obejmuje tak podstawowe zagadnienie, jak utrzymanie czystości. Do odkurzania powierzchni w muzeach, bibliotekach czy archiwach należy stosować odkurzacze z filtrem wodnym lub wydajnym i odpowiednim filtrem cząstek stałych. Ważne jest, aby powierzchnie użytkowe były czyszczone regularnie za pomocą materiałów niepylących, np. z mikrofibry. Ściereczki z mikrofibry powinny być często wymieniane i prane po każdorazowym użyciu. Czyszczenie powierzchni użytkowych w pomieszczeniach ze zbiorami (magazyny, sale ekspozycyjne, pracownie konserwatorskie itd.) należy wykonywać, ograniczając do minimum zastosowanie wody. Wszelkie środki czyszczące nie powinny zawierać składników niebezpiecznych zarówno dla ludzi, jak i obiektów zabytkowych. Najlepiej, gdyby środki czyszczące były bezzapachowe, bez barwników, o jak najprostszym składzie chemicznym.
- Nie bez znaczenia jest dobór odpowiednich materiałów wykończeniowych czy elementów aranżacji wnętrz. Zgodnie z normą PN-ISO 11799:2006⁶¹: „Umieblowanie i wyposażenie powinno być wykonane z niepalnych materiałów, nieemitujących, przyciągających ani zatrzymujących kurzu”. Pomieszczenia z przeznaczeniem na przechowywanie i eksponowanie obiektów zabytkowych powinny mieć gładką posadzkę bez dywanów czy wykładzin. Meble użytkowe w pomieszczeniach magazynowych, ekspozycyjnych czy pracowniach konserwatorskich powinny być wykonane z materiałów niezawierających szkodliwych związków chemicznych, jak formaldehyd. Należy zwracać uwagę na dobór bezpiecznych materiałów przy aranżacji wystaw, przy remontach, wyposażaniu magazynów czy pracowni. Warto przygotować listę materiałów, jakie są bezpieczne (lub listę materiałów czy związków

⁶¹ PN-ISO 11799:2006..., dz. cyt.

wykluczonych) i już na etapie przygotowywania zapytania ofertowego dotyczącego remontu czy kupna mebli dołączyć ją do dokumentacji.

- I na koniec – monitoring zanieczyszczenia powietrza. Norma PN-ISO 11799:2006 zaleca, aby powietrze w magazynach wolne było od zanieczyszczeń, gazów wykazujących właściwości kwasowe, gazów utleniających oraz kurzu. Zalecane jest regularne monitorowanie jakości powietrza wewnątrz magazynów. Zaleca się również, by częstotliwość przeprowadzonych obserwacji umożliwiała wykrywanie sezonowych lub innych powtarzających się zmian wspomnianych zanieczyszczeń.

W normie PN-ISO 11799:2006 określono poziomy *Dopuszczalnego stężenia zanieczyszczeń powietrza atmosferycznego*, które obejmują: stężenie formaldehydu, kwasu octowego, ozonu, tlenków siarki i azotu, cząsteczek kurzu ze sporami pleśni. O ile temperatura i wilgotność powietrza to parametry, które są rutynowo monitorowane w większości pomieszczeń magazynowych i ekspozycyjnych, o tyle zanieczyszczenia chemiczne i pyłowe powietrza to parametry, które są monitorowane tylko w nielicznych polskich instytucjach. Warto jednak takie badania przeprowadzić chociaż raz w roku (najlepiej raz na kwartał czy raz w miesiącu), aby wytypować te pomieszczenia, w których zanieczyszczenia powietrza mogą stanowić zagrożenie dla zbiorów i/lub ludzi. Dobrą praktyką jest zastrzeżenie (najlepiej już na etapie zapytania ofertowego lub w wymogach przetargowych), że odbiór budynku, remontowanego pomieszczenia czy nowej ekspozycji, odbędzie się jedynie wtedy, kiedy jakość powietrza w pomieszczeniu będzie spełniała wymogi np. normy ISO 11799.

Monitoring takich parametrów powietrza, jak temperatura, wilgotność, stężenie pyłów zawieszonych (PM) można wykonywać w ramach pomiarów chwilowych oraz w trybie ciągłym. Do pomiarów chwilowych służą niewielkie, przenośne termohigrometry oraz przenośne mierniki wielofunkcyjne. Każde z tych urządzeń powinno posiadać certyfikat kalibracji. Na zdjęciach (Ryc. 15A, B) przedstawiono pomiary stężenia PM i formaldehydu z równoległym pomiarem temperatury i wilgotności względnej powietrza wykonane przenośnym urządzeniem TROTEC® PC220 (Trotec GmbH & Co. KG, Heinsberg, Germany). Analizy stężenia innych związków chemicznych wymienionych w tym rozdziale można wykonać np. metodą spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (ang. *Fourier Transform Infrared* – FTIR). Służą do tego przenośne analizatory, które umożliwiają jednoczesny pomiar stężenia nawet 30 różnych związków chemicznych (organicznych i nieorganicznych).

Innym rozwiązaniem jest instalacja systemu do pomiarów parametrów fizykochemicznych powietrza w trybie ciągłym. Na rynku istnieją rozwiązania, które oprócz parametrów klimatu mierzą w trybie ciągłym stężenie pyłów zawieszonych w powietrzu⁶², stężenie dwutlenku węgla

⁶² M. Dyda, M. Dziurzyński, Ł. Istel, D. Kakietek, A. Laudy, M. Draniak, T. Buźniak, A. Modrzewska, A. Wiercińska, A. Czajka, A. Włodarczyk-Sętek, *Mikrobiologiczne...*, dz. cyt.

Ryc. 15. Pomiar stężenia (A) pyłów zawieszonych oraz (B) formaldehydu w powietrzu w pracowni konserwatorskiej. Równoległy pomiar temperatury [AT] i wilgotności względnej powietrza [RH]. Fot. M. Dyda



czy natężenie światła widzialnego i UV⁶³. Są to rozwiązania dedykowane zarówno dla pomiarów prowadzonych wewnątrz budynków, jak i w celu określenia parametrów na zewnątrz budynku (parametrów fizykochemicznych tła). Systemy pomiarowe wewnątrz i na zewnątrz budynku działają m.in. w Muzeum Zamku Królewskiego na Wawelu i Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie. Umożliwiają one ciągłość pomiarów niezależnie od dostępności zasilania czy dostępu do sieci Wi-Fi lub GSM. Ponadto systemy pozwalają na podgląd pomiarów w czasie rzeczywistym i dostęp do danych historycznych nie tylko na monitorze komputera, lecz także na telefonie za pomocą aplikacji, np. w systemie Android⁶⁴. Monitoring parametrów klimatu i stężenia pyłów zawieszonych powinien obejmować zarówno sale ekspozycyjne, jak i magazyny

⁶³ M. Strojcki, *Badanie zmienności mikroklimatycznej w celu określenia właściwej strategii ochrony dzieł sztuki* [w:] E. Wiłkojć, J. Winiewicz (red.), dz. cyt., s. 93–99.

⁶⁴ M. Dyda, M. Dziurzyński, Ł. Isteł, D. Kakietek, A. Laudy, M. Draniak, T. Buźniak, A. Modrzewska, A. Wiercińska, A. Czajka, A. Włodarczyk-Sętopek, *Mikrobiologiczne...*, dz. cyt.

oraz pracownie konserwatorskie. Osoby zainteresowane szerszym opracowaniem na ten temat odsyłam do publikacji opisującej wyniki wieloletniego projektu monitoringu zanieczyszczeń powietrza w Getty Trust Museum⁶⁵.

ZANIECZYSZCZENIE MIKROBIOLOGICZNE POWIETRZA

Kolejny aspekt zanieczyszczeń, to zanieczyszczenia mikrobiologiczne powietrza. Aby podkreślić, jak duże znaczenie dla zbiorów ma kontrola jakości powietrza, posłużę się przykładem, który opisał Bogdan Filip Zerek w książce podsumowującej jego kilkuletnie doświadczenie pracy w Laboratorium Mikrobiologicznym Biblioteki Narodowej⁶⁶. Jest to przykład infekcji mykologicznej XVIII-wiecznej mapy. Przed przystąpieniem do prac konserwatorskich mapa została poddana dezynfekcji tlenkiem etylenu. Skuteczność dezynfekcji została potwierdzona badaniami mikrobiologicznymi. W końcowej fazie konserwacji, z powodu nadmiernej wilgotności zarówno obiektu, jak i powietrza, już po 48 godzinach od zawilgocenia, zaobserwowano na powierzchni mapy plamy pleśni. Badanie powietrza w pracowni konserwatorskiej wykazało, że liczebności grzybów pleśniowych (jednostki tworzące kolonie, czyli zdolne do wzrostu) w aerozolu powietrza w pomieszczeniu były na średnim poziomie. Wnioski są takie, że nawet umiarkowanie lub bardzo czyste powietrze, zawiera wystarczająco dużo materiału mikrobiologicznego, aby przy odpowiednio wysokiej wilgotności spowodować zakażenie obiektów. Tym samym – im czystsze mikrobiologicznie powietrze, tym mniej zarodników pleśni na powierzchniach. Obiekt czysty mikrobiologicznie ma zatem większe szanse na przeżycie, a konserwator dłuższy czas na działanie, przy wystąpieniu „katastrofy” jaką jest zawilgocenie obiektu.

Metodyka pobierania próbek powietrza do analiz mikrobiologicznych w pomieszczeniach muzealnych, archiwalnych i bibliotecznych nie różni się od sposobów stosowanych do monitorowania środowiska wytwarzania produktów farmaceutycznych czy spożywczych. Przez dziesięciolecia wykonywana była z wykorzystaniem zjawiska sedymentacji, czyli osadzania się cząsteczek obecnych w powietrzu na powierzchni (metoda sedymentacyjna Kocha). W metodzie sedymentacyjnej Kocha mikroorganizmy opadają przez określony czas na powierzchnię stałego podłoża mikrobiologicznego na szalce Petriego. Następnie szalki są inkubowane, a wyizolowane kolonie mikroorganizmów zliczane oraz identyfikowane. Wadą metody sedymentacyjnej jest to, że na otrzymane wyniki znacząco wpływa cyrkulacja powietrza w pomieszczeniu. Dużą zaletą natomiast jest prostota pomiaru, który nie wymaga specjalistycznych urządzeń pomiarowych.

⁶⁵ C.M. Grzywacz, *Monitoring for Gaseous Pollutants in Museum Environments*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, <http://d2aohiyo3d3idm.cloudfront.net/publications/virtuallibrary/0892368519.pdf>.

⁶⁶ B.F. Zerek, *The Preservation and Protection of Library Collections: A Practical Guide to Microbiological Controls*, Elsevier, Oxford 2014.

Obecnie próbki powietrza pobiera się metodą zderzeniową (impakcyjną), z wykorzystaniem specjalnego próbnika do pobierania powietrza. Takim urządzeniem jest np. MAS-100 Eco® air-sampler (MerckKGaA, Darmstadt, Germany) (Ryc. 16A–C). W urządzeniu umieszcza się szalkę z podłożem mikrobiologicznym i pobiera określoną objętość powietrza. Taka metodyka znacznie skraca czas pobrania próbki i pozwala na uzyskanie wyników obciążonych dużo niższym błędem pomiarowym, niż w przypadku pobierania próbek metodą sedymentacji. Kolejne etapy analizy są takie same, jak w przypadku próbek powietrza pobranych metodą sedymentacji. Po okresie inkubacji, w odpowiednich dla wzrostu mikroorganizmów warunkach, zlicza się i identyfikuje wyrosłe kolonie bakterii i grzybów.

Ryc. 16. (A) Pobór próbek do analizy czystości mikrobiologicznej powietrza w pracowni konserwatorskiej, (B) pomiar kontrolny na zewnątrz budynku oraz (C) monitoring czystości mikrobiologicznej powietrza w sali ekspozycyjnej po remoncie. Fot. M. Dyda



W Bibliotece Narodowej (BN) zestandaryzowano procedurę pobierania próbek powietrza w celu monitorowania poziomów skażenia mykologicznego w pomieszczeniach magazynowych i pracowniach⁶⁷. Ponieważ pod opieką mikrobiologów BN znajduje się 70 pomieszczeń magazynowych (dane z 2014 r.), nawet przy założeniu, że kolekcja jest jednorodna, samo zadanie stanowiło nie lada wyzwanie logistyczne. Ostatecznie przyjęto zasadę, że jedno piętro w głównym budynku magazynowym jest badane co miesiąc przez cały rok, a pozostałe piętra raz w roku. Pozostałe pomieszczenia badane są w 7-miesięcznych cyklach. Wszystkie próbki do analiz czystości mykologicznej powietrza od 2008 r. są wykonywane w BN z wykorzystaniem urządzenia MAS-100 Eco® air sampler (MerckKGaA, Darmstadt, Germany). Do analiz powietrza stosowane jest podłoże maltozowe MEA (ang. *Malt Extract Agar*). Liczba analiz w danym pomieszczeniu uzależniona jest od jego wielkości. W Bibliotece Narodowej przyjęto wykonywanie analiz w odległości o około 1–1,5 m w danym pomieszczeniu. W magazynie o powierzchni 1000 m² pobieranych jest jednorazowo 30 próbek powietrza. Probki pobierane są na 3 różnych wysokościach: 0,4 m, 1,4 m oraz 2,4 m, a objętość pobieranego powietrza „jest dopasowywana do przewidywanych wyników”. W Bibliotece Narodowej było to średnio 44 litry powietrza dla próbek pobieranych w pomieszczeniach i 21,3 litry powietrza dla próbek kontrolnych (tła), pobieranych na zewnątrz.

Ostatni aspekt analiz, czyli objętość powietrza, jaką należy pobrać, aby dało się wyizolować odpowiednią dla analizy liczbę kolonii grzybów pleśniowych (objętość dostosowana do spodziewanego zanieczyszczenia powietrza w danej lokalizacji), jest dość istotny. Idealnym wynikiem jest izolacja 5–20 kolonii grzybów pleśniowych na szalce z podłożem mikrobiologicznym. „Przewidywanie wyników”, a tym samym ustalenie zalecanej objętości powietrza, jaką należy pobrać do badania, aby uzyskać pożądany zakres nie jest łatwe dla mikrobiologa, który pojawia się codziennie w innej instytucji.

W ostatnich latach przeprowadziliśmy na Wydziale Biologii Uniwersytetu Warszawskiego kilka projektów poświęconych monitoringowi jakości mikrobiologicznej powietrza w instytucjach muzealnych i archiwalnych. Zauważyliśmy wpływ rodzaju wentylacji, przeznaczenia pomieszczenia, wilgotności względnej powietrza oraz liczby osób w pomieszczeniu na otrzymywane wyniki. Na podstawie kilkuletnich obserwacji sugerujemy, aby dla pomieszczeń wyposażonych w sprawny system HVAC pobierać powietrze w objętościach nawet 100 lub 200 litrów, ponieważ większość zanieczyszczeń mikrobiologicznych jest zatrzymywana na filtrach. Dla pomieszczeń z wentylacją grawitacyjną i/lub mechaniczną bez filtrów wskazane jest pobieranie 3 różnych objętości powietrza na jednej wysokości (około 150–200 cm) w danym punkcie pomiarowym (gdy wykonujemy pomiar po raz pierwszy w pomieszczeniu). W okresie zimowym sugerujemy objętości 25, 50 i 100 litrów, a w pozostałych sezonach 10, 20 i 50 litrów powietrza (wiosna, lato, jesień). Pobieranie próbek do analiz mikrobiologicznych powietrza w 3 różnych objętościach

⁶⁷ Tamże.

należy wykonać w ramach rozpoznania, w pomieszczeniach, w których monitoring mikrobiologiczny powietrza nie miał miejsca. W kolejnych pomiarach, w tych samych lokalizacjach, można zastosować metodologię stosowaną w Bibliotece Narodowej (3 różne wysokości w danym punkcie pomiarowym, przy jednej objętości powietrza, ustalonej na podstawie wyników uzyskanych dla próbek pobranych podczas pierwszej wizyty).

Dobór podłoża mikrobiologicznego do analiz powietrza też nie jest prosty. Jeżeli istnieje taka możliwość, warto tego typu analizy wykonywać z wykorzystaniem minimum 2 różnych podłoży, aby zwiększyć prawdopodobieństwo izolacji szerszego spektrum mikroorganizmów obecnych w powietrzu. Najczęściej do izolacji grzybów pleśniowych stosuje się podłoża: Czapek-Dox, MEA (Malt Extract Agar), DRBC (Dichloran Rose Bengal Chloramphenicol), Sabourauda, agar Brzeczkowy oraz PDA (Potato Dextrose Agar).

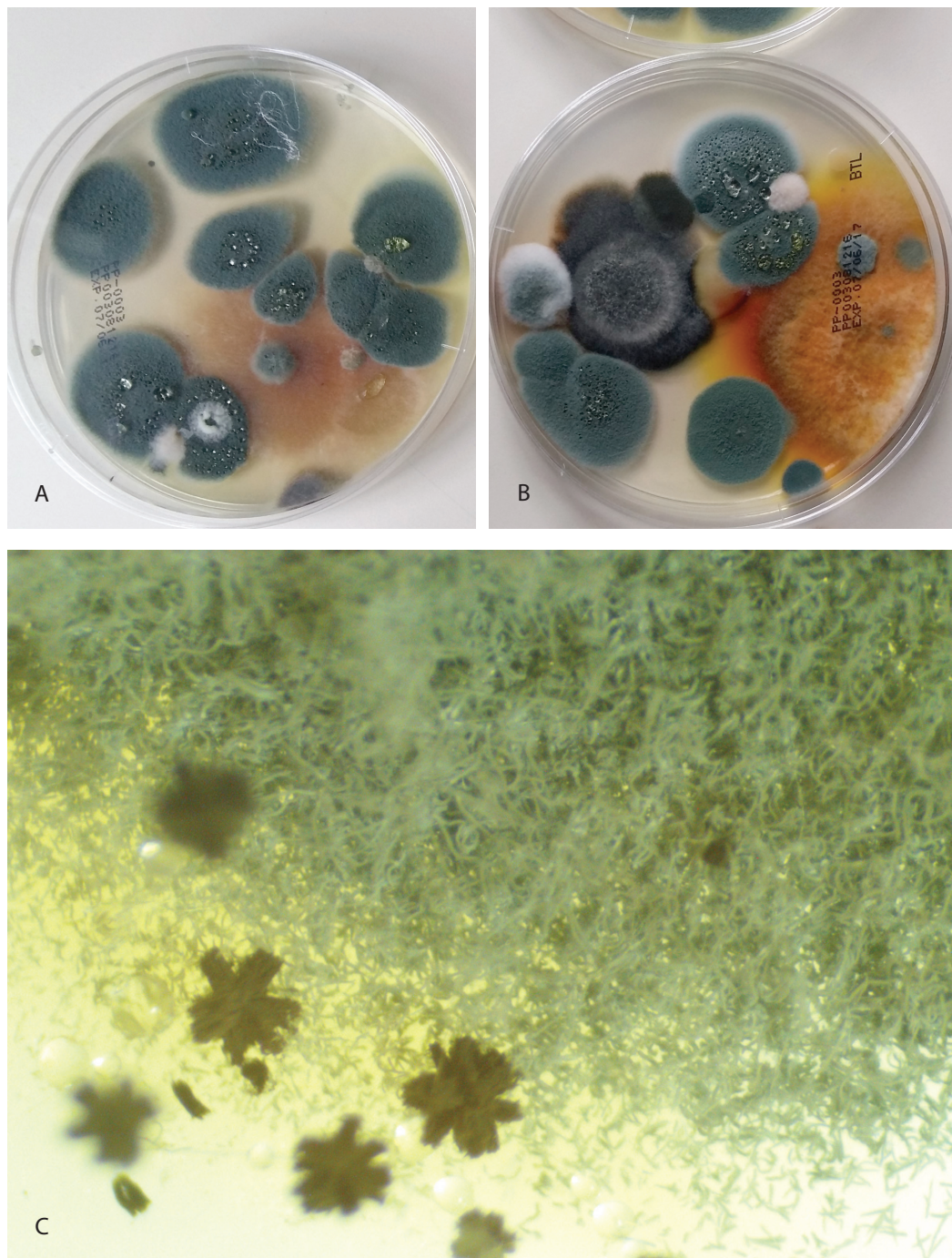
Kolejny aspekt analizy mikrobiologicznej powietrza to dobór liczby próbek (liczbę pomiarów należy dostosować do wielkości pomieszczenia) – im większa powierzchnia i kubatura pomieszczenia, tym większą liczbę powtórzeń należy wykonać. Samo zliczanie wyrosłych kolonii można wykonać już po 7 dniach inkubacji, a wyniki przelicza się na liczbę jednostek tworzących kolonie (jtk) w m³ powietrza i odnosi do norm (o nich w kolejnych rozdziałach). Po kolejnych 7 dniach inkubacji w temperaturze 24–26°C (14 dni od momentu pobrania próbek) kolonie grzybów pleśniowych zarodnikują, co pozwala na ich identyfikację na podstawie cech makro- i mikroskopowych (Ryc. 17A–C). Identyfikacja do gatunku na podstawie cech morfologicznych i kluczy do oznaczania pleśni jest czasochłonna i trudna. Ponadto, w wyniku obecnie prowadzonych identyfikacji z wykorzystaniem analiz genetycznych, systematyka grzybów pleśniowych ulega ciągłym zmianom. Na potrzeby ochrony zabytków w zupełności wystarcza identyfikacja pleśni do rodzaju, co podkreśla w swojej książce Bogdan Filip Zerek⁶⁸.

W odróżnieniu do analizy czystości powietrza w magazynach, monitoring czystości mikrobiologicznej w salach ekspozycyjnych powinien zostać rozszerzony o analizy liczebności bakterii. Tutaj również, tak jak w przypadku analiz zanieczyszczenia powietrza zarodnikami pleśni, uzyskane wyniki zależą w dużej mierze od zastosowanego podłoża i pobranej objętości powietrza na szalkę. Badania przeprowadzone przez naszą grupę badawczą wykazały, że dla instytucji muzealnych miarodajne wyniki analiz bakteriologicznych powietrza uzyskuje się na podłożu Fraziera z żelatyną. Dodanie każdego kolejnego podłoża mikrobiologicznego zwiększa różnorodność izolowanych z powietrza bakterii⁶⁹.

⁶⁸ Tamże.

⁶⁹ M. Dziurzyński, M. Dyda, P. Drabik, A. Ignatenko, A. Ciok, A. Laudy, M. Dzik, A. Skłodowska, *Selection of Microbiological Medium Adapted for the Isolation of the Largest Diversity of Bacteria From the Air in Museums – Application of Metagenomics Methods* (poster), 13th Indoor Air Quality in Heritage and Historic Environments Conference, 10–12 października 2018, Kraków.

Ryc. 17. (A, B) Kolonie grzybów pleśniowych z rodzajów *Penicillium* sp., *Alternaria* sp., *Cladosporium* sp. i *Epicoccum* sp. wyizolowane z próbek powietrza na podłożu Czapek-Doxa oraz (C) zdjęcie mikroskopowe pleśni *Aspergillus niger* i *Penicillium* sp. Fot. M. Dydą



Z kolei badania przeprowadzone w Zamku Królewskim na Wawelu wykazały, że duża liczba zwiedzających negatywnie wpływa na jakość powietrza w salach ekspozycyjnych. Najwyższe liczebności bakterii i grzybów pleśniowych (jednostek tworzących kolonie) w powietrzu występują w pierwszych salach ekspozycyjnych przy wejściu na trasę dla zwiedzających oraz w salach najchętniej odwiedzanych⁷⁰. Co więcej, liczba bakterii jest znacznie wyższa w dniach, kiedy Muzeum jest udostępnione zwiedzającym. Zaobserwowano również, że w dniach, kiedy prowadzone są na Zamku prace porządkowe, wzrasta liczba izolowanych z powietrza kolonii grzybów pleśniowych. Dzieje się tak dlatego, że w trakcie pastowania i froterowania posadzek oraz odkurzania mebli tapicerowanych dochodzi do podnoszenia osiadłych na powierzchniach zarodników. Aby poprawić jakość powietrza i ograniczyć osadzanie się form przetrwalnych mikroorganizmów na powierzchniach obiektów, w wytypowanych lokalizacjach zainstalowano oczyszczacze powietrza. Badania porównawcze jakości powietrza w tych pomieszczeniach wykazały skuteczność podjętych działań⁷¹.

Prace badawcze prowadzone w Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie w apartamentach królewskich, w których znajdują się jedwabne obicia naścienne, nie wykazały natomiast wyraźnej zależności między obecnością zwiedzających, porą roku a liczebnością bakterii proteolitycznych izolowanych z powietrza. Nie zauważono również wyraźnego wpływu obecności zwiedzających na liczbę bakterii proteolitycznych izolowanych bezpośrednio z zabytkowych welurów genueńskich. Jak wykazały badania laboratoryjne, bakterie izolowane z powierzchni welurów powodują degradację jedwabnych nici i barwników (kwasu karminowego), a tym samym mogą przyczyniać się do niszczenia zabytkowych obić naściennych⁷².

Co warto podkreślić, dotychczas nie opracowano jednolitych norm dla klasyfikowania czystości mikrobiologicznej powietrza (z wyjątkiem np. przemysłu farmaceutycznego, gdzie normy są niezwykle restrykcyjne), w tym norm dla instytucji muzealnych, bibliotecznych i archiwalnych. W dalszej części tekstu zebrałam propozycje oceny jakości powietrza opracowane przez różne instytucje (Tabela 4) i zestawiałam je z proponowanymi (ale jeszcze nie obowiązującymi) „zalecanymi stężeniami drobnoustrojów” w powietrzu, jakie opracowywane są obecnie w Polsce (Tabela 5). We wskazaniach uwzględniona jest liczba jednostek tworzących kolonie w m³ powietrza (jtk/m³) oraz różnorodność izolowanych z powietrza mikroorganizmów. Warto jednak zwrócić uwagę na maksymalne dopuszczalne liczebności mikroorganizmów, jakie są uznawane w Polsce za bezpieczne i porównać je z wartościami proponowanymi w innych krajach (czerwona czcionka w tabelach 4 i 5).

⁷⁰ M. Dyda, *Monitoring...*, dz. cyt.

⁷¹ Konferencja Naukowa *Prezentacja...*, dz. cyt. oraz wystawa czasowa *Madonna...*, dz. cyt.

⁷² A. Laudy, *Microbiological Quality of Indoor Air in the Wilanów Palace Museum and its Potential Impact on the Biodeterioration of the Genova Velvets*, Muzeum Pałac Króla Jana III w Wilanowie, Warszawa 2013.

Tabela 4. Proponowane maksymalne liczebności mikroorganizmów w aerozolu powietrza w międzynarodowych rozporządzeniach oraz wytycznych w krajach europejskich

Raport Komisji Europejskiej*	
Ogólna liczba bakterii jtk/m ³	Zanieczyszczenie powietrza w budynkach nieprzemysłowych
<50	bardzo małe
50–100	małe
100–500	średnie/zwiększone
500–2000	duże
>2000	bardzo duże
Propozycje Niderlandzkiego Instytutu Dziedzictwa Narodowego**	
Liczebność grzybów jtk/m ³	Wskazania
0–25	brak wskazań, bezpieczne poziomy zanieczyszczenia
25–100	prawdopodobnie istnieje źródło skażenia, weryfikacja pomiaru
100–1000	istnieje źródło skażenia, często jest to pleśń na obiekcie
>1000	wzrost aktywnych pleśni w pomieszczeniu
25–100 jednego gatunku	istnieje źródło zakażenia w pomieszczeniu
Raport WHO***; Kanadyjskie standardy jakości powietrza wewnątrz budynków****	
Liczebność grzybów jtk/m ³	Zalecenia
0	nie należy podejmować działań
≥50 jednego gatunku	należy zidentyfikować źródło skażenia
≤ 150 ÷ 200 różne gatunki	nie należy podejmować działań
≥200 różne gatunki	należy zachować ostrożność i kontrolować środowisko
≤ 400 ÷ 500 głównie Cladosporium i Alternaria	nie należy podejmować działań
≥500 CFU/m³	należy zidentyfikować źródło skażenia
Niedopuszczalna jest obecność patogennych grzybów, takich jak <i>Aspergillus fumigatus</i> czy <i>Stachybotrys atra</i>	

Źródło: * *Biological Particles in Indoor Environments, Report No. 12: Indoor Air Quality and its Impact on Man*, Commission of European Communities, Brussels–Luxembourg 1993; ** A.W. Brokerhof, B. van Zanen, A. den Teuling, *Fluffy Stuff. Integrated Control of Mould in Archives*, Netherlands Institute for Cultural Heritage, Amsterdam 2007; *** *Indoor Air Quality: Biological Contaminants: Report on a WHO Meeting*, Rautavaara, 29 August – 2 September 1988; **** *Determination of Fungal Propagules in Indoor Air*, Canada Mortgage and Housing Corporation, CMHC, Paracel Laboratories, Ottawa 1988.

Tabela 5. Propozycje zalecanych stężeń drobnoustrojów i endotoksyny w powietrzu pomieszczeń opracowane przez Polski Zespół Ekspertów ds. Czynników Biologicznych

Czynnik mikrobiologiczny	Dopuszczalne stężenie w pomieszczeniach	
	Roboczych zanieczyszczonych pyłem organicznym	Mieszkalnych i użyteczności publicznej
Bakterie (razem)	100 000 jtk/m³*	5000 jtk/m³
Bakterie Gram-ujemne	20 000 jtk/m ³ *	200 jtk/m ³
Termofilne promieniowce	20 000 jtk/m ³ *	200 jtk/m ³
Grzyby	50 000 jtk/m³*	5000 jtk/m³
Czynniki z grupy 3. i 4. zagrożenia	0 jtk/m ³	0 jtk/m ³
Endotoksyna bakteryjna	200 ng/m ³ (2000 JE/m ³)	5 ng/m ³ (50 JE/m ³)
Propozycje dopuszczalnych stężeń w powietrzu w archiwach, muzeach, magazynach muzealnych i pracowniach konserwacji zabytków		
Czynnik mikrobiologiczny	jtk/m ³	
	Dopuszczalne stężenie, akceptowalne z punktu widzenia stanu zdrowia pracowników	Wartość graniczna stężenia sygnalizująca istnienie wewnętrznego źródła mikrobiologicznych zanieczyszczeń, groźnego z punktu widzenia stanu zachowania zbiorów
Bakterie (ogółem)	5000*	–
Grzyby (ogółem)	5000*	–
Bioaerozol (bakterie i grzyby)	–	150
Czynniki z grupy 3. i 4. zagrożenia	0	0
jtk – jednostka tworząca kolonie; JE – Jednostka Endotoksyczna		
* Dla frakcji respirabilnej proponowane wartości powinny być o połowę niższe i wynosić: $5,0 \times 10^4$ jtk/m ³ dla bakterii mezofilnych; $1,0 \times 10^4$ jtk/m ³ dla bakterii Gram-ujemnych; $1,0 \times 10^4$ jtk/m ³ dla termofilnych promieniowców; $2,5 \times 10^4$ jtk/m ³ dla grzybów.		

Źródło: M. Pośniak (red.), *Międzyresortowa Komisja ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. Czynniki szkodliwe w środowisku pracy – wartości dopuszczalne*, CIOP-PIB, Warszawa 2018, https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P25000149031403773780227&html_tresc_root_id=405&html_tresc_id=325&html_klucz=405&html_klucz_spis=405.

Jak można zauważyć, polskie normy dosyć liberalnie podchodzą do aspektu ochrony zdrowia pracowników. Polski Zespół Ekspertów ds. Czynników Biologicznych w pomieszczeniach zanieczyszczonych pyłem organicznym dopuszcza liczebność grzybów pleśniowych na poziomie 50 000 jtk/m³ (Tabela 5), 5000 jtk/m³ w archiwach, muzeach, magazynach muzealnych i pracowniach konserwacji zabytków, podczas gdy propozycje Niderlandzkiego Instytutu Dziedzictwa Narodowego przy 1000 jtk/m³ wskazują na wzrost aktywnych pleśni w pomieszczeniu (ostatnie przytoczone, bardzo restrykcyjne normy, sprawdzają się w pomieszczeniach z systemem HVAC wyposażonym w system filtrów).

Dodam jeszcze, że w tej samej instytucji (Centralny Instytut Ochrony Pracy) opublikowano dane z pomiarów wykonanych w sortowniach odpadów komunalnych. Zgodnie z opracowaniem⁷³: „Średnie stężenia bakterii w powietrzu wahały się w zakresie od 1013 jtk/m³ do 3245 jtk/m³, a w przypadku aerozolu grzybowego od 482 jtk/m³ do 4343 jtk/m³. Przekroczenia wartości dopuszczalnych dla badanych bioaerozoli stwierdzono dla stężenia grzybów na stanowiskach sortowaczy, gdzie zmierzone jego stężenia przekraczały od 15% do 60% zalecaną wartość, ustaloną na poziomie 50 000 jtk/m³”. I jeśli teraz porównamy **średnie wyniki** otrzymane w sortowni odpadów komunalnych [!] z „propozycjami zalecanych stężeń opracowane przez Polski Zespół Ekspertów ds. Czynników Biologicznych” (Tabela 5), stwierdzimy, że chyba trudno będzie znaleźć takie środowisko pracy, w którym proponowane normy nie będą spełnione...

Eksperti zaproponowali również wartości „dopuszczalnych stężeń w powietrzu w archiwach, muzeach, magazynach muzealnych i pracowniach konserwacji zabytków”. Proponowane wartości graniczne stężenia bioaerozolu (150 jtk/m³) dla bezpiecznego przechowywania zbiorów (Tabela 5) są bardziej restrykcyjne dla obiektów, niż dla środowiska pracy. Nie wydają się jednak rozwiązaniem idealnym. Po pierwsze, przyjęte określenie „bioaerozol”, dla zsumowanej liczebności bakterii i grzybów w powietrzu, nie jest ani określeniem właściwym (bioaerozol to określenie bardzo szerokie, które obejmuje zarówno małe cząsteczki wirusów, jak i zarodniki czy fragmenty roślin; Schemat 4), ani słusznym w kontekście ochrony zabytków (inne zagrożenie stanowią dla zabytków bakterie, a inne grzyby pleśniowe). Po drugie, w większości budynków instytucji kultury w kraju (wyposażonych w grawitacyjny lub mechaniczny system wentylacji, wentylację bez filtrów) słusznym podejściem wydaje się porównanie wyników uzyskanych wewnątrz pomieszczeń, do tych, które uzyskano w dniu pomiaru na zewnątrz budynku (pomiar kontrolny). Pomiar referencyjne tła, przy określaniu skażenia mykologicznego powietrza w pomieszczeniach, prowadzi m.in. Biblioteka Narodowa. Jak podkreśla Bogdan Filip Zerek⁷⁴ stosowanie bezwzględnej wartości granicznej przy ocenie jakości mykologicznej powietrza może dawać ludzkie poczucie bezpieczeństwa. I tutaj autor jako jedne z najlepszych przytacza

⁷³ R.L. Górny, M. Cyprowski, M. Gołoft-Szymczak, A. Stobnicka, A. Ławniczek-Wałczyk, *Opracowanie narzędzi do oceny narażenia pracowników sortowni odpadów komunalnych na szkodliwe czynniki biologiczne oraz zaleceń do profilaktyki*, 2015, https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/11120/Gorny_biologiczne.pdf.

⁷⁴ B.F. Zerek, *The Preservation...*, dz. cyt.

niemieckie wskazania opublikowane przez dr. Heinza-Jörna Moriske i dr Regine Szewzyk^{75, 76}, które podsumowuje w następujący sposób:

- 1) dla grup mikroorganizmów najczęściej izolowanych z powietrza zewnętrznego w dużych liczebnościach (*Cladosporium*, *Alternaria*, *Botrytis*, sterylne grzybnia, drożdże), bezpieczne wartości dla powietrza w pomieszczeniach są wtedy, gdy liczebność (jtk/m³) danego, wyizolowanego rodzaju mikroorganizmu jest na poziomie od 0,8 niższa do 1,2 razy wyższa od liczebności tego rodzaju stwierdzonej w próbkach powietrza zewnętrznego;
- 2) dla pozostałych grup mikroorganizmów hodowlanych liczebność (jtk/m³) danego rodzaju w powietrzu w pomieszczeniach jest bezpieczna, jeżeli jest niższa niż liczebność tego rodzaju w powietrzu zewnętrznym.

Jeżeli oba wymienione warunki są spełnione, jest mało prawdopodobne, że w pomieszczeniu występuje źródło skażenia. Inaczej, jeżeli liczebność i różnorodność grzybów pleśniowych izolowanych w budynku nie różni się od poziomów tła, możemy przyjąć, że wyniki są zadowalające. Jeżeli jednak wartość jtk/m³ w pomieszczeniu jest dużo wyższa niż na zewnątrz – istnieje źródło infekcji w pomieszczeniu.

Zarówno opisana metodyka, jak i interpretacja wyników odnoszą się do analiz mikrobiologicznych powietrza wykonanych metodami hodowlanymi. Zaletą metod hodowlanych jest dość niski koszt i ogólna dostępność. Do wad bez wątpienia należy długi czas oczekiwania na wynik. Kolejnym ograniczeniem jest to, że metodami hodowlanymi możemy izolować tylko te mikroorganizmy, które potrafią wykorzystać składniki odżywcze w zastosowanym podłożu mikrobiologicznym.

Alternatywą dla określenia zanieczyszczenia mykologicznego powietrza w pomieszczeniach może być metoda pośrednia, oparta na analizie stężenia ergosterolu w powietrzu⁷⁷. Ergosterol jest składnikiem błon komórkowych charakterystycznym dla wszystkich komórek grzybów niezależnie od stadium rozwoju (strzępki/zarodniki) czy grupy grzybów (pleśnie/drożdże/grzyby wielkoowocnikowe). Pobór próbki w takim badaniu jest krótki, jednak do wykonania analizy niezbędna jest specjalistyczna aparatura. Jak wykazały badania prof. Beaty Gutarowskiej, w pomieszczeniach zagrzybionych zawartość ergosterolu przekracza 2 µg/m³ powietrza, natomiast w pomieszczeniach bez oznak infekcji mykologicznej zawartość ergosterolu jest 10-krotnie

⁷⁵ C. Baschien, H.-J. Moriske, K. Becker, M. Kolossa-Gehring, R. Szewzyk, *Recommendations for Detection and Remediation of Mold Growth in Indoor Environments in Germany* [w:] E. Johanning, P.R. Morey, P. Auger (red.), *Bioaerosols – Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Bioaerosols, Fungi, Bacteria and Mycotoxins in Indoor and Outdoor Environments and Human Health*, Albany, NY: Fungal Research Group Foundation, Inc., s. 328–335.

⁷⁶ H.-J. Morisk, R. Szewzyk, M. Leonidas, *Mould Guide: Guide for the Prevention, Investigation, Evaluation and Remediation of Indoor Mould Growth*, nr 32, WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control, Berlin 2003.

⁷⁷ B. Gutarowska, *Grzyby...*, dz. cyt.

niższa. Na podstawie otrzymanych wyników autorka opracowania wskazuje poziom 0,2 µg ergosterolu/m³ powietrza, jako maksymalny dopuszczalny poziom zanieczyszczenia powietrza „grzybami pleśniowymi”.

Alternatywą jest analiza związków wydzielanych przez pleśń w trakcie wzrostu. Do takich należy oznaczanie stężenia enzymów pochodzenia mykologicznego, jak: β-N-acetylhexosaminidazy (NAHA) szybkimi testami fluorometrycznymi⁷⁸ czy mikrobiologicznych lotnych związków organicznych (ang. *Microbial Volatile Organic Compounds* – MVOCs) z wykorzystaniem chromatografii⁷⁹. Ograniczeniem analiz ergosterolu i MVOCs, na powszechną i ogólnodostępną skalę, jest bez wątpienia ograniczona dostępność specjalistycznej aparatury. Analizy stężenia NAHA to rozwiązanie, które doczekało się wdrożenia. Na rynku dostępne **są zestawy do wykonania testu kolorymetrycznego na obecność NAHA już w czasie** kilkudziesięciu minut od pobrania próbki⁸⁰. Niestety zakup urządzenia pomiarowego i jednorazowych próbników jest dość kosztowny.

DOBRE PRAKTYKI – ZANIECZYSZCZENIE MIKROBIOLOGICZNE POWIETRZA

Prewencja dotycząca zanieczyszczeń mikrobiologicznych powietrza w niewielkim stopniu różni się od działań wskazanych dla ograniczania zanieczyszczenia fizykochemicznego powietrza w pomieszczeniach (zob. podrozdział „Dobre praktyki – zanieczyszczenie fizykochemiczne powietrza”). Opiera się na założeniu, że im mniej mikroorganizmów znajduje się w powietrzu w pomieszczeniu, tym mniej zanieczyszczeń mikrobiologicznych kumuluje się na powierzchniach obiektów.

- Do podstawowych działań prewencyjnych w pomieszczeniach, w których znajdują się zbiory, można zaliczyć ograniczanie wymiany powietrza z powietrzem zewnętrznym poprzez zamykanie wlotów świeżego powietrza⁸¹. Innym skutecznym rozwiązaniem jest instalacja systemu HVAC wyposażonego w wydajne filtry powietrza lub stosowanie przenośnych oczyszczaczy powietrza wyposażonych w filtry HEPA (szczegółowe uwagi zob. podrozdział „Dobre praktyki – zanieczyszczenie fizykochemiczne powietrza”). Instalując oczyszczacze w pomieszczeniach ekspozycyjnych, wskazane jest przeszkolenie personelu i uruchamianie oczyszczaczy powietrza w miarę możliwości również w trakcie rutynowych

⁷⁸ Y.D. Aktas, J. Shi, N. Blades, D. D’Ayala, *Indoor Mould Testing in a Historic Building: Blickling Hall*, „Heritage Science” 2018, nr 6, 51, DOI: 10.1186/s40494-018-0218-x.

⁷⁹ T. Sawoszczuk, *Wczesna detekcja aktywności pleśni powodujących biodeteriorację obiektów na podłożu papierowym w oparciu o analizę mikrobiologicznych lotnych związków organicznych*, „Notes Konserwatorski” 2016, nr 18, s. 103–128.

⁸⁰ <https://www.mycometer.com/products/mycometer-air/about-mycometer-air/>.

⁸¹ B.F. Zerek, *The Preservation...*, dz. cyt.

prac porządkowych. W pracowniach konserwatorskich oczyszczacze powietrza powinny być uruchamiane każdorazowo w trakcie prowadzonych prac.

- Monitoring jakości mikrobiologicznej powietrza nie jest możliwy w trybie ciągłym. Dla pomieszczeń wyposażonych w sprawny system HVAC z systemem filtrów analizy jakości mikrobiologicznej powietrza wystarczą nawet raz w roku. Dla pomieszczeń z wentylacją grawitacyjną i/lub mechaniczną wskazane jest prowadzenie badań minimum raz na kwartał, a najlepiej raz w miesiącu. Monitoring powinien obejmować sale o różnym przeznaczeniu i różnym natężeniu ruchu turystycznego, aby wytypować lokalizacje, w których należy ograniczyć liczbę zwiedzających lub zainstalować oczyszczacze powietrza. Ponadto takie badania powinny być wykonywane każdorazowo przy RH powyżej 60% utrzymującej się przez kilka dni, po zalaniach, zakończonych remontach, przy odbiorze budynków, pomieszczeń czy po aranżacji nowej ekspozycji, przed wprowadzeniem zbiorów.
- Analizy mikrobiologiczne powietrza są rutynowo wykonywane w instytucjach posiadających własne laboratoria mikrobiologiczne, jak Biblioteka Narodowa, Muzeum Narodowe w Warszawie, Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie czy Archiwum Główne Akt Dawnych. Instytucje kultury, które nie posiadają odpowiednio wyposażonego laboratorium, ze względów bezpieczeństwa (ryzyko kontaminacji zbiorów, narażenia pracowników) analizy mikrobiologiczne mogą zlecać instytucjom państwowym, jak Laboratorium Konserwatorskie Zbiorów Bibliotecznych Biblioteki Narodowej (LKZB BN), Narodowy Instytut Zdrowia Publicznego – Państwowy Zakład Higieny (NIZP–PZH), Stacjom Sanitarno-Epidemiologicznym, Instytutowi Medycyny Pracy im. Nofera w Łodzi, Centralnemu Instytutowi Ochrony Pracy, ośrodkom uniwersyteckim czy laboratoriom prywatnym.
- Zdarza się, że przyczyną wysokich zanieczyszczeń mikrobiologicznych powietrza w pomieszczeniu jest niewłaściwe użytkowanie nawilzaczy, klimatyzatorów czy osuszaczy powietrza. W przypadku tych ostatnich należy po zakończeniu pracy urządzenia bezwzględnie sprawdzać, czy pojemnik z wodą został opróżniony. Po opróżnieniu pojemnika należy go umyć, ewentualnie zdezynfekować i wysuszyć. Dla urządzeń typu klimatyzatory wskazana jest okresowa kontrola mikrobiologiczna czystości filtrów (jeżeli nie posiadają automatycznego systemu powiadamiania o konieczności ich wymiany). I najbardziej niebezpieczne – nawilzacze powietrza. Niewłaściwe użytkowanie nawilzaczy powietrza może doprowadzić do zainfekowania filtrów i w efekcie wywołać nawet katastrofę mikrobiologiczną w magazynie lub pomieszczeniu ekspozycyjnym. Aby jej uniknąć: (a) należy każdorazowo opróżniać zbiornik z wodą w nawilzaczach przed ponownym napełnieniem (nie dolewać wody do pozostałości wody stojącej w pojemniku); (b) nie należy stosować wody kranowej, lecz wodę destylowaną; (c) raz w tygodniu pojemnik na wodę należy wyjąć z nawilzacza i dokładnie umyć z użyciem detergentu, można dodatkowo pojemnik zdezynfekować (np. alkoholem lub środkiem o niskiej zawartości chloru), a następnie dokładnie wypłukać resztki detergentów i dezynfektantów przed ponownym napełnieniem; (d) należy regularnie wymieniać filtry w nawilzaczach; (e) należy opróżniać i czyścić

pojemnik z wodą w nawilżaczu przed planowanym dłuższym wyłączeniem urządzenia z użytkowania.

- Ważne są również regularne przeglądy konserwatorskie kolekcji oraz regularne kontrole w pomieszczeniach magazynowych i ekspozycyjnych, dzięki którym szybko można zareagować w przypadku wykrycia zalania czy infekcji mikrobiologicznej. Świetnie sprawdza się przeszkolenie personelu, który na co dzień znajduje się w salach muzealnych, na co ma szczególnie zwracać uwagę (przebarwienia ścian, obiektów, wyposażenia wnętrz, zacieki, kolonie mikroorganizmów). Personel o każdej zauważonej, niepokojącej zmianie powinien bezzwłocznie powiadomić opiekuna zbiorów.
- Kolejne działanie prewencyjne, to utrzymanie czystości powierzchni użytkowych. Jeżeli powierzchnie są odkurzane, należy stosować odkurzacze z filtrem wodnym (lub z wydajnym filtrem cząstek stałych). Materiały tekstylne używane do czyszczenia powierzchni powinny być niepyłące (np. mikrofibra). Należy je często wymieniać i prać (najlepiej po każdorazowym użyciu). Czyszczenie powierzchni użytkowych w pomieszczeniach ze zbiorami (magazyny, sale ekspozycyjne, pracownie konserwatorskie itd.) należy wykonywać, ograniczając do minimum zastosowanie wody. Wszelkie środki czyszczące nie powinny zawierać składników niebezpiecznych zarówno dla ludzi, jak i obiektów zabytkowych.
- I oczywiście monitoring wilgotności względnej powietrza oraz utrzymywanie poziomu RH poniżej 60%, co ograniczy możliwość rozwoju pleśni, nawet na silnie zanieczyszczonych powierzchniach.

Analizy zanieczyszczenia mikrobiologicznego powierzchni

Analizy mikrobiologiczne powierzchni to zagadnienie, które obejmuje więcej aspektów, niż analizy zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza. Przy analizach powierzchni mamy większą różnorodność materiałów, z których pobieramy próbki, różne metody pobierania próbek, różne metody analiz mikrobiologicznych, jak i zróżnicowane podejście do interpretacji wyników przeprowadzonych analiz. Wynika to z braku jednoznacznych i szczegółowych wytycznych, jak należy prowadzić analizy mikrobiologiczne powierzchni obiektów zabytkowych, bibliotecznych i archiwalnych.

WSKAZANIA DO ANALIZ MIKROBIOLOGICZNYCH POWIERZCHNI

Laboratorium Konserwatorskie Zbiorów Bibliotecznych Biblioteki Narodowej (LKZB BN) do oceny mikrobiologicznej dużych zbiorów archiwalnych i bibliotecznych (o wielkości powyżej 100 000 jednostek) stosuje metodę stanfordzką⁸². Metodę stanfordzką zastosowano m.in. w Wieloletnim Programie Rządowym „Kwaśny papier” oraz do oceny stanu zachowania zbiorów archiwalnych i bibliotecznych^{83, 84, 85}. Zgodnie z metodą stanfordzką z przeznaczonego do badania zasobu wybiera się losowo 384 obiekty (próba reprezentatywna). Na podstawie oceny wizualnej próby reprezentatywnej, typuje się obiekty ze wskazaniem do wykonania badań mikrobiologicznych. Jeżeli wytypowane do badań obiekty będą stanowiły 1/3 próby reprezentatywnej, można przyjąć (przy założeniu, że ponad 90% obiektów w zbiorach sąsiaduje z dwoma innymi), że całość zbioru wymaga przeprowadzenia takich analiz. Biorąc pod uwagę czasochłonność i koszty analiz mikrobiologicznych, lepszym rozwiązaniem będzie dezynfekcja

⁸² B.F. Zerek, *Instytut Konserwacji Zbiorów Bibliotecznych Biblioteki Narodowej – przegląd działalności 2015–2019*, „Notes Konserwatorski” 2019, nr 20, s. 59–90.

⁸³ W. Sobucki, *Pilotażowe badanie stanu zachowania zbiorów z XIX i XX w. w Bibliotece Narodowej w Warszawie*, „Notes Konserwatorski” 2002, nr 6, s. 75–83.

⁸⁴ Tenże, *Stan zachowania księgozbiorów powstałych po 1800 roku* [w:] B. Drewniewska-Idziak (red.), *Stan zachowania polskich zbiorów bibliotecznych i archiwalnych z XIX i XX wieku*, Biblioteka Narodowa, Warszawa 2006, s. 6–22.

⁸⁵ W. Sobucki, A. Czajka, *Stan zachowania archiwaliów z XIX i XX wieku* [w:] B. Drewniewska-Idziak (red.), dz. cyt., s. 23–35.

całości zbioru. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość wykonania losowania i wizualnej oceny obiektów przez pracowników danej instytucji⁸⁶. Jeżeli mniej, niż 1/3 wylosowanych obiektów posiada wskazania do wykonania analiz mikrobiologicznych, wtedy ich wykonanie jest jak najbardziej słuszne i pozwoli oszacować, jak dużą część zasobu należy poddać dezynfekcji.

Na pytanie, z jakich powierzchni warto pobrać próbkę, trudno byłoby tutaj jednoznacznie odpowiedzieć. W pierwszej kolejności decyzję o wykonaniu analizy mikrobiologicznej należy wykonać dla obiektów, na których okiem nieuzbrojonym widać kolonie pleśni, ślady aktywności wody, przebarwienia czy wykwyty. Przykładowe, charakterystyczne miejsca dla obiektów papierowych i obwolut książek, z powierzchni których należy pobrać próbki do analiz (a nawet poddać dezynfekcji bez wcześniejszej analizy skażenia), przedstawiłam na zdjęciach (Ryc. 18–22) oraz w rozdziale „Mikrobiologiczne czynniki biodeterioracji” (Ryc. 7, 9, 11).

Zdarzają się obiekty, które nie wyglądają na zanieczyszczone mikrobiologicznie, a z powierzchni których izolujemy mikroorganizmy. Jako przykład posłużę się wynikami analiz, jakie wykonaliśmy dla 268 próbek otrzymanych z jednej z instytucji archiwalnych. Były to obiekty archiwalne przechowywane w teczkach. Każdorazowo materiał do analiz był pobierany metodą suchego wymazu z zewnętrznej powierzchni teczki oraz z przechowywanych wewnątrz dokumentów.

Ryc. 18. (A, B, C) Obwoluty książek z widocznym wzrostem kolonii grzybów pleśniowych. Takie obiekty należy bezwzględnie kwalifikować do analiz mikrobiologicznych lub dezynfekcji. Fot. M. Dydą



⁸⁶ W. Sobucki, *Pilotażowe...*, dz. cyt.

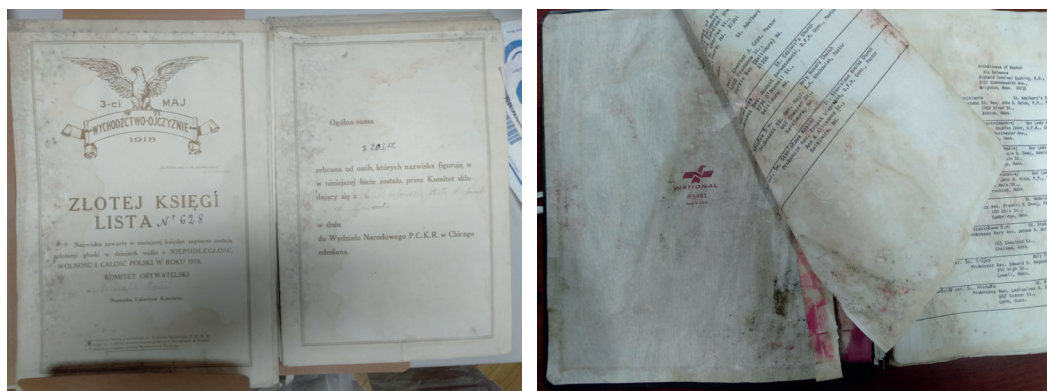
Ryc. 19. (A) Fotografia i (B) dokumenty archiwalne z widocznymi przebarwieniami, śladami aktywności wody oraz widocznym wzrostem kolonii grzybów pleśniowych. Fot. M. Dyda



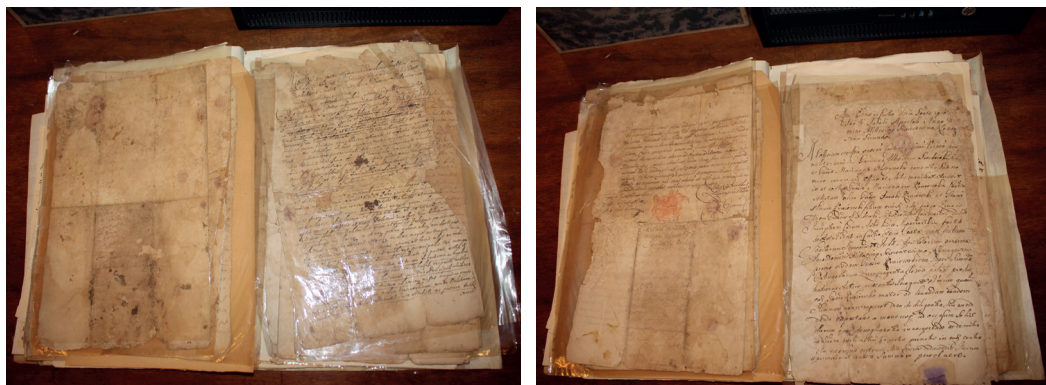
Ryc. 20. (A, B) Obiekty papierowe z widocznymi przebarwieniami i śladami aktywności wody. Fot. M. Dyda



Ryc. 21. (A, B) Obiekty papierowe z widocznymi śladami aktywności wody i widocznym wzrostem kolonii pleśni. Fot. M. Dyda



Ryc. 22. (A, B) Obiekty rękopiśmienne przechowywane w foliowych torebkach. Niewłaściwe warunki przechowywania (w tym prawdopodobnie aktywność wody) przyczyniły się do powstałych zniszczeń. Widoczne liczne przebarwienia i kolonie grzybów pleśniowych. Fot. M. Dyda



Większość dokumentów, jak i opakowań zewnętrznych, nie posiadała widocznych zmian stanu zachowania (na podstawie otrzymanej dokumentacji). Część dokumentów kilka lat wcześniej była dezynfekowana metodą fumigacji tlenkiem etylenu. Po wysianiu otrzymanych próbek na stałych podłożach mikrobiologicznych wyizolowaliśmy grzyby (pojedyncze kolonie) jedynie z 15 próbek pobranych z archiwaliów i 64 próbek pobranych z powierzchni teczek. Wszystkie wyizolowane z powierzchni teczek grzyby należały do rodzajów najczęściej izolowanych z powietrza. Otrzymane wyniki wskazują, że zanieczyszczenia mikrobiologiczne teczek to efekt kumulacji zarodników na ich powierzchniach w wyniku sedymentacji. Nie można wykluczyć, że źródłem skażenia była wentylacja w pomieszczeniach magazynowych. Zdeponowane na powierzchni teczek zanieczyszczenia mikrobiologiczne stanowią zagrożenie deterioracyjne, ze względu na ryzyko wzrostu pleśni na obiektach. W przypadku zanieczyszczeń mikrobiologicznych stwierdzonych na powierzchni opakowań zewnętrznych bez widocznych zmian w ich stanie zachowania, oraz gdy przechowywane wewnątrz dokumenty nie są skażone mikrobiologicznie, wystarczającym zabiegiem będzie mechaniczne oczyszczenie powierzchni i wymiana teczek na nowe.

Odkurzanie pozwala również na usunięcie zanieczyszczeń, w tym zarodników pleśni, które osadzają się na powierzchni zabytkowych tkanin naściennych, tapicerki mebli czy obrazów. W Muzeum Zamku Królewskiego na Wawelu odkurzanie największych arrasów eksponowanych w komnatach królewskich jest wykonywane co 2 lata. Z jednej strony odkurzanie pozwala na usunięcie większości zarodników pleśni, z drugiej jednak strony, w trakcie takich czynności, nie udaje się uniknąć mikrozniszczeń. Fragmenty blaszki metalowej oplatającej nici (szczególnie skorodowane warstwy metalu), nawet w trakcie delikatnych działań konserwatorskich ulegają wykruszaniu. Aby obniżyć częstotliwość odkurzania naściennych tkanin (a tym samym powstających mikrozniszczeń), w ramach działań prewencyjnych w Sali Senatorskiej zainstalowano oczyszczacze powietrza o dużej wydajności. Poprawa jakości powietrza wpłynie na

zmniejszenie liczby zanieczyszczeń osadzających się na powierzchniach. Dzięki takiej prewencji będzie można prowadzić odkurzanie w odstępach 3-, a być może nawet 4-letnich⁸⁷.

METODY ANALIZ MIKROBIOLOGICZNYCH POWIERZCHNI

Do oceny czystości mikrobiologicznej powierzchni obiektów zabytkowych najczęściej stosuje się metody hodowlane oparte na izolacji mikroorganizmów na stałych podłożach mikrobiologicznych. Pozwalają one na analizę liczebności i różnorodności bakterii i/lub grzybów pleśniowych. Analizy mikrobiologiczne są czasochłonne, lecz pozwalają ocenić, czy obserwowane zmiany na powierzchniach obiektów są pochodzenia mikrobiologicznego, ustalić rodzaj mikroorganizmu, a dzięki temu ocenić jego potencjał biodeterioracyjny i chorobotwórczy. Tym samym służą przy podejmowaniu decyzji dotyczących konieczności przeprowadzenia dezynfekcji (która nie jest obojętna dla obiektu) czy weryfikacji skuteczności tego procesu.

Obecnie brak jest norm dotyczących metodologii pobierania próbek z obiektów zabytkowych do analiz mikrobiologicznych. Niektórzy badacze⁸⁸ adaptują metody stosowane w przemyśle spożywczym⁸⁹, które wymagają nawet zwilżenia powierzchni. Do analiz powierzchni zabytkowych konieczne jest stosowanie metod nieniszczących. Do takich zaliczane są metoda odcisku sterylną bibułą oraz metoda suchego wymazu. W dalszej części tekstu opisałam również metodę z wykorzystaniem płytek kontaktowych typu Rodac, którą można stosować do oceny czystości mikrobiologicznej powierzchni użytkowych (meble, opakowania z tworzyw sztucznych, metalu).

Niezależnie od przyjętej metody, prace przy pobieraniu próbek należy wykonywać w jednorazowych rękawiczkach, które po pobraniu każdej próbki należy przecierać dezynfektantem na bazie alkoholu. Błat stołu, na którym umieszczamy kolejne, potencjalnie skażone obiekty, również każdorazowo powinien być przecierany środkiem dezynfekującym. Przed położeniem obiektu na powierzchni zdezynfekowanej należy się upewnić, że środek całkowicie odparował.

Pobieranie próbek do analiz płytkami kontaktowymi Rodac

W zakładach produkcyjnych, służby zdrowia, do kontroli jakości wytwarzania produktów leczniczych i w przemyśle spożywczym w ocenie zanieczyszczenia mikrobiologicznego rutynowo stosowane są płytki kontaktowe typu Rodac. Płytki kontaktowe są stosowane do monitoringu czystości mikrobiologicznej blatów, ścian, podłóg, odzieży, dłoni pracowników. Pobór próbki

⁸⁷ M. Dyda, *Monitoring...*, dz. cyt.

⁸⁸ T. Sawoszczuk, *Analiza ilościowa mikroorganizmów występujących na powierzchni walizy przechowywanej na terenie byłego KL Auschwitz-Birkenau w Oświęcimiu*, „Notes Konserwatorski” 2016, nr 18, s. 129–142.

⁸⁹ PN-ISO 18593:2005 *Mikrobiologia żywności i pasz. Horyzontalne metody pobierania próbek z powierzchni z użyciem płytek kontaktowych i wymazów*.

jest bardzo prosty, i sprowadza się do jednej czynności – wykonania „stempla”. Jest to możliwe dzięki temu, że płytki posiadają menisk wypukły agaru. Chociaż jest to metoda szybka i powtarzalna, niestety, nie można jej zastosować do pobierania próbek z powierzchni obiektów zabytkowych. Podłoże agarowe, które znajduje się na płytce jest wilgotne i zawiera substancje odżywcze, umożliwiające wzrost mikroorganizmów. Przy pobieraniu próbki z powierzchni obiektu zabytkowego istnieje ryzyko pozostawienia tych substancji oraz zwilżenia obiektu w miejscu pobrania próbki. Płytki Rodac można jednak z powodzeniem stosować do analiz czystości mikrobiologicznej powierzchni użytkowych, takich jak blaty stołów w pracowniach konserwatorskich czy powierzchnie regałów w magazynach. Należy jednak pamiętać, aby po pobraniu próbki analizowaną powierzchnię przetrzeć środkiem na bazie alkoholu lub detergentem (w celu usunięcia resztki podłoża mikrobiologicznego) oraz przygotować płytkę kontrolną (bez odcisku), którą inkubujemy w takich samych warunkach, jak próbki badane.

Pobieranie próbek metodą wymazu

Zaletą metody wymazu jest możliwość pobrania materiału przez pracownika muzeum i przesłanie wymazówki w probówce transportowej do instytucji specjalizującej się w analizach mikrobiologicznych. Wymazówka składa się ze sterylnej probówki z tworzywa sztucznego oraz wymazówki zakończonej wacikiem z tworzywa sztucznego lub bawełny. Probówkę należy otworzyć i ostrożnie wyjąć aplikator, uważając, aby wacik nie dotknął innych powierzchni, a w szczególności skóry osoby pobierającej próbkę. Wacik należy przyłożyć do badanej powierzchni, a następnie, obracając i pocierając wymazówką, należy pobrać próbkę z powierzchni obiektu (Ryc. 23A). Najlepiej pobrać materiał z powierzchni 10 x 10 cm lub 5 x 5 cm. Przy pobieraniu próbek metodą wymazu pomocny może okazać się szablon o odpowiednich wymiarach (Ryc. 23B).

Ryc. 23. Pobieranie próbek z powierzchni obiektu metodą suchego wymazu: (A) z powierzchni filmu oraz (B) z powierzchni okładki, z wykorzystaniem sterylnego szablonu z otworem wewnętrznym 25 cm². Fot. M. Dydka



Dalsze etapy analizy odbywają się w laboratorium mikrobiologicznym, którego przykładowe wyposażenie ilustrują zdjęcia (Ryc. 24–25). Aby nie doszło do kontaminacji próbek lub narażenia pracowników na szkodliwe czynniki biologiczne, posiewy mikrobiologiczne (przeniesienie pobranego materiału z wymazówki na szalkę z podłożem mikrobiologicznym) wykonuje się w specjalistycznych komorach laminarnych z pionowym przepływem powietrza (Ryc. 25B). W takich komorach powietrze zasysane jest przez system filtrów HEPA i wydmuchiwane w przestrzeni roboczej, dzięki czemu przestrzeń pracy jest wolna od zanieczyszczeń mikrobiologicznych.

Ryc. 24. Podstawowe wyposażenie laboratorium mikrobiologicznego. Fot. M. Dydą



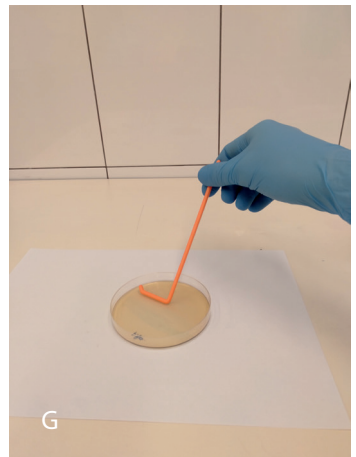
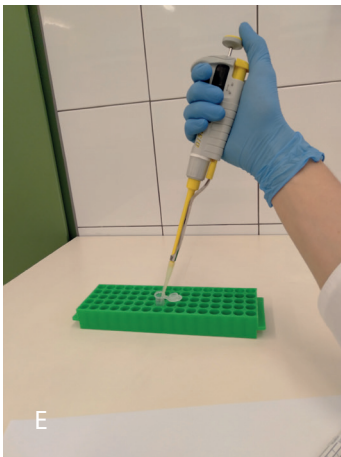
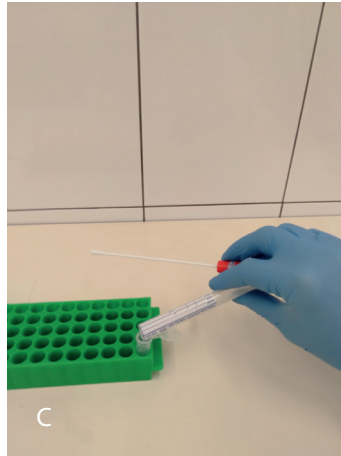
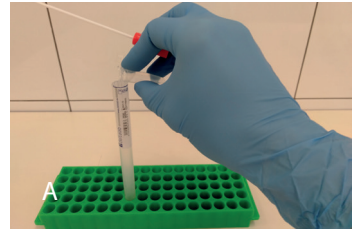
Ryc. 25. (A) Przygotowanie próbek i szalek do wykonania posiewów mikrobiologicznych oraz (B) wnętrze komory z laminarnym przepływem powietrza. Fot. M. Dydą



Kolejne etapy obejmują transfer materiału mikrobiologicznego z powierzchni wacika na powierzchnię szalki ze stałym podłożem agarowym. Na zdjęciach (Ryc. 26A–G) przedstawiłam główne etapy posiewu mikrobiologicznego z pominięciem opalania końcówki próbki transportowej przy każdorazowym otwieraniu probówki.

1. Do probówki transportowej należy przenieść 1–2 ml (w zależności od średnicy probówki) sterylnego roztworu soli fizjologicznej (NaCl) o stężeniu 0,85% (Ryc. 26A), a następnie obciąć aplikator (patyczek z wacikiem) opalonymi nad płomieniem nożyczkami.

Ryc. 26. Kolejne etapy wysiewania materiału pobranego metodą wymazu na szalki z podłożami mikrobiologicznymi: (A) przeniesienie do probówki roztworu soli fizjologicznej, (B) wytrząsanie próbki metodą worteksowania, (C) przeniesienie zawartości wymazówki do probówki, (D) wytrząsanie próbki metodą worteksowania, (E) pobranie próbki pipetą, (F) naniesienie próbki na podłoże agarowe i (G) rozprowadzenie próbki po powierzchni podłoża gładzawką. Fot. M. Dydą



2. Po obciążeniu wacik z pobranym materiałem opada na dno probówki z płynem. Kolejny etap to „wytrząsanie” probówki przez 40 sek. – 1 min metodą wortexowania (Ryc. 26B). W efekcie zebrane z powierzchni zanieczyszczenia mikrobiologiczne zostają przeniesione z wacika do płynu.
3. Następnie płyn z zawiesiną mikroorganizmów przenosimy z probówki transportowej (uważając, by wacik w niej pozostał) do mniejszej, sterylnej probówki laboratoryjnej (Ryc. 26C).
4. Po kolejnym (Ryc. 26D), tym razem krótkim wytrząsaniu (około 10 sek.), należy pobrać 100 µl płynu pipetą (Ryc. 26E) i przenieść go na powierzchnię zestalonego agarem podłoża mikrobiologicznego na szalce Petriego (Ryc. 26F). Innym wariantem analizy jest wysiewanie kolejnych rozcieńczeń pobranego materiału⁹⁰. Taką strategię posiewów można przyjąć dla zbiorów silnie zainfekowanych, dla których spodziewamy się bardzo wysokiej liczby izolowanych mikroorganizmów. Oczywiście wariantów analiz jest dużo więcej⁹¹.
5. Ostatnim etapem jest rozprowadzenie płynu zawierającego mikroorganizmy („wglaskanie” zawiesiny) po powierzchni podłoża agarowego (Ryc. 26G).
6. Dla danej partii próbek (z danej instytucji / z danego dnia wykonywania analiz) należy wykonać posiew kontrolny, weryfikujący czystość mikrobiologiczną użytego sprzętu, miejsca wykonywania posiewu i umiejętność pracy mikrobiologa w warunkach sterylnych. Próbę kontrolną stanowi wysianie na podłożu mikrobiologiczne próbki zawierającej jedynie roztwór soli fizjologicznej.
7. Następnie próbki inkubowane są przez 7 dni w warunkach optymalnych dla wzrostu pleśni (w temperaturze 26°C w cieplarni lub w temperaturze pokojowej). Po tym czasie wyrosłe kolonie są zliczane, a po kolejnych 4–7 dniach inkubacji można wykonać identyfikację wyrosłych kolonii grzybów pleśniowych na podstawie cech makro- i mikroskopowych. Jeśli chcemy wyizolować bakterie potencjalnie patogenne, stosujemy wybiórcze lub różnicujące podłoża mikrobiologiczne, umożliwiające oznaczenie danego typu patogenu (np. podłożo MacConkey z fioletem krystalicznym dla oznaczenia bakterii z rodziny *Enterobacteriaceae*). Istnieją też podłoża do izolacji szerokiego spektrum bakterii (np. agar odżywczy). Szalki w kierunku oznaczenia patogenów (bakterie mezofilne) inkubujemy najczęściej przez 24–48 h w temperaturze 37°C. Jeżeli chcemy wyizolować bakterie o potencjale deterioracyjnym (bakterie psychrofilne), płytki inkubujemy w temperaturze pokojowej.

Pobieranie próbek metodą odcisku sterylną bibułą Whatmana

Pobieranie próbek z wykorzystaniem sterylnego fragmentu bibuły typu Whatman łączy prostotę pobierania próbek metodą płytek kontaktowych z elementami wysiewania próbek pobranych metodą wymazu. Jest to „stempel”, czyli odcisk, jaki wykonuje się z wykorzystaniem płytek Rodac, w którym zamiast agaru, stosujemy dodatkowy element – medium transportowe,

⁹⁰ B.F. Zerek, *The Preservation...*, dz. cyt.

⁹¹ T. Sawoszczuk, *Analiza...*, dz. cyt.

czyli bibułę (w poprzedniej metodzie do transferu materiału służyła wymazówka i płyn). Obie metody – wymazu oraz odcisku sterylną bibułą, są stosowane w LKBZ BN od lat.

Tak jak w przypadku każdej metody mikrobiologicznej, należy uważać, aby nie doszło do kontaminacji w trakcie pobierania próbki. Bibułę („stempel”) przenosi się za pomocą opalanej nad płomieniem lub zdezynfekowanej płynem na bazie alkoholu pęsety na powierzchnię analizowanego obiektu. Najczęściej bibuła ma powierzchnię 25 cm². Bibułę dociskamy do analizowanej powierzchni, używając sterylnej głaszczki (Ryc. 27A, B). Następnie bibułę przenosimy pęsetą bezpośrednio na podłoże mikrobiologiczne (Ryc. 28). Przy tej metodzie próbę kontrolną stanowi bibuła, przeniesiona bezpośrednio na szalkę z podłożem mikrobiologicznym. Kolejny etap nie różni się od pkt 7 wcześniej opisanej metody – jest to inkubacja szalek w odpowiednich warunkach i zliczanie oraz identyfikacja wyizolowanych mikroorganizmów. Przykładowe szalki z wyizolowanymi mikroorganizmami i wynik identyfikacji grzybów pleśniowych przedstawiono w dalszej części tekstu (Ryc. 29A–C).

IDENTYFIKACJA MIKROORGANIZMÓW

Niezależnie od metody pobrania próbki ostatnim etapem analizy jest identyfikacja wyrosłych mikroorganizmów. Mikroorganizmy identyfikuje się na podstawie: cech morfologicznych, właściwości biochemicznych, składników błony lub ściany komórkowej oraz analiz genetycznych.

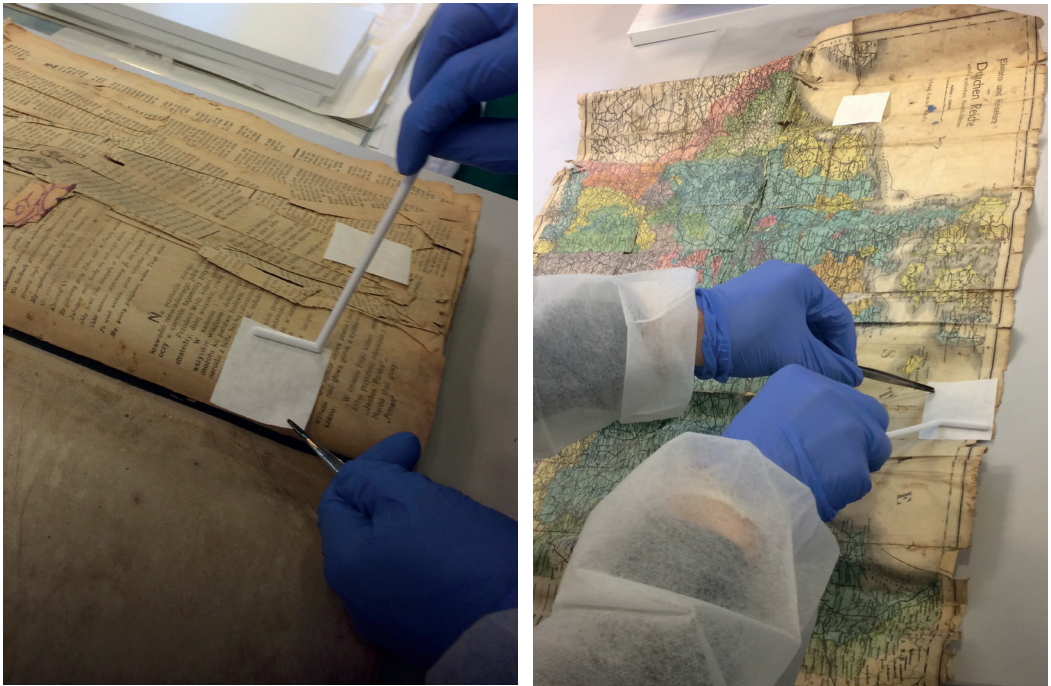
Identyfikacja na podstawie cech makro- i mikroskopowych jest stosowana rutynowo do identyfikacji grzybów pleśniowych. Ze względu na duże podobieństwo morfologiczne, ustalenie taksonomii grzyba do gatunku jest czasochłonne i trudne. Wymaga przygotowania czystych kultur grzybów pleśniowych, serii preparatów mikroskopowych umożliwiających wykonanie dokładnych (i wielokrotnych) pomiarów spor, konidioforów, metuli i innych elementów strzępek grzybni. Identyfikacja grzybów pleśniowych do rodzaju jest wystarczająca w dziedzinie ochrony zabytków. Jest również o wiele prostsza i nie zabiera tyle czasu, co wcześniej wspomniana. Wystarczy obserwacja makroskopowa kolonii na szalce od strony awersu i rewersu oraz obserwacja w mikroskopie, przy świetle przechodzącym. Identyfikację wyizolowanych kolonii pleśni przeprowadza się na podstawie kluczy i publikacji naukowych. Uproszczony przewodnik do identyfikacji rodzajów grzybów pleśniowych najczęściej izolowanych z obiektów papierowych zawarł w swojej publikacji Bogdan Filip Zerka⁹².

Identyfikacja mikroorganizmów na podstawie ich właściwości biochemicznych

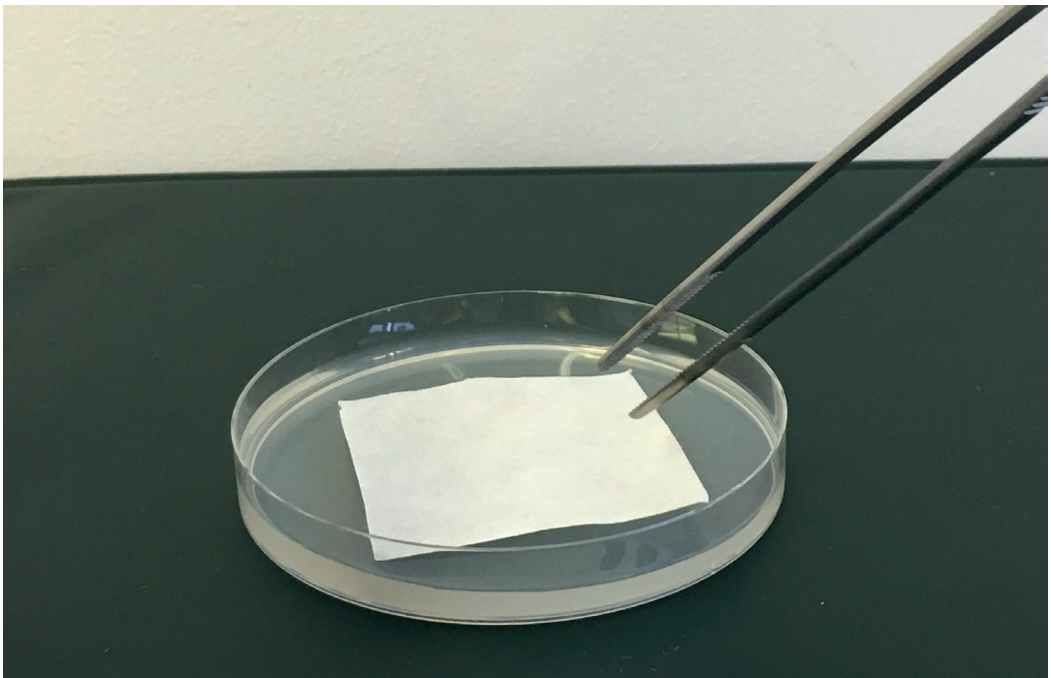
Obecnie mamy wystandaryzowane metody identyfikacji właściwości wyizolowanych mikroorganizmów na podstawie kolorymetrycznych szeregów testów biochemicznych.

⁹² B.F. Zerek, *The Preservation...*, dz. cyt.

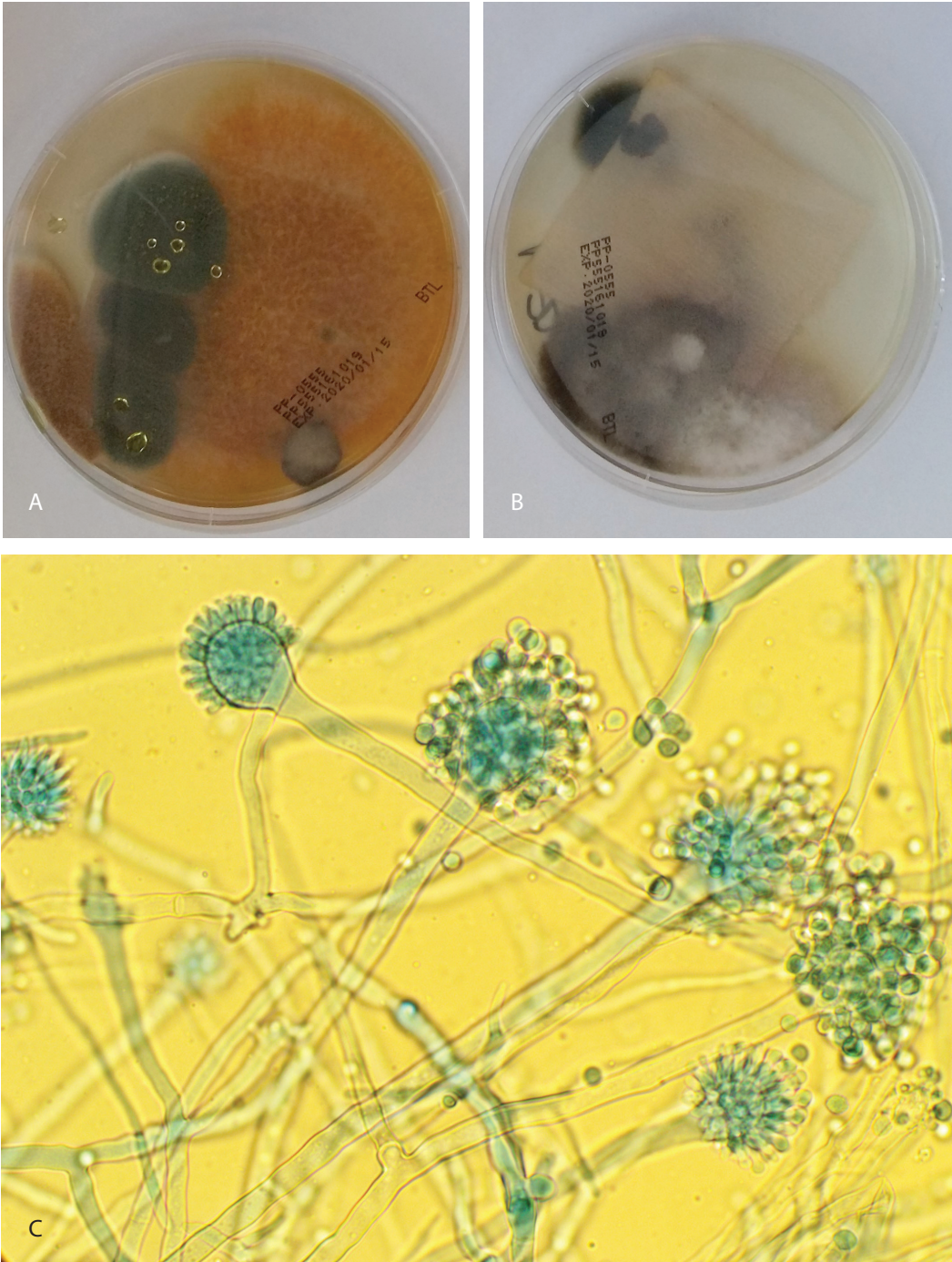
Ryc. 27. (A, B) Pobieranie próbek z powierzchni obiektów metodą odcisku sterylnej bibuły. Fot. M. Dyda



Ryc. 28. Przeniesienie pobranego materiału na szalkę z podłożem mikrobiologicznym. Fot. M. Dyda



Ryc. 29. Zdjęcia szalek z podłożem MEA po 14-dniowej inkubacji. Widoczne na zdjęciach kolonie to: (A) *Epicoccum* sp. (2 kolonie), *Cladosporium* sp. (1 kolonia) i *Penicillium* sp. (3 kolonie) oraz (B) *Cladosporium* sp. (2 kolonie), *Alternaria* sp. (3 kolonie) oraz *Botrytis* sp. (1 kolonia). (C) Preparat mikroskopowy *Aspergillus* sp. Fot. M. Dyda.



Metoda opracowana została na potrzeby diagnostyki klinicznej. Takie testy są szybkie i pozwalają na identyfikację bakterii do gatunku. Znalazły również zastosowanie do identyfikacji bakterii izolowanych z obiektów zabytkowych⁹³.

Identyfikacja mikroorganizmów na podstawie składników błony i ściany komórkowej

Podstawowym testem wykorzystującym różnice w budowie ściany komórkowej bakterii jest barwienie metodą Grama. Barwienie różnicuje bakterie na dwie grupy: bakterie Gram-dodatnie (posiadają grubszą ścianę komórkową o jednolitej strukturze, barwią się na kolor fioletowy) i bakterie Gram-ujemne (o cieńszej ścianie komórkowej zbudowanej z warstw, wybarwiane na różowo). Obecnie najszybszą metodą identyfikacji mikroorganizmów jest metoda oparta na spektrometrii mas – MALDI-TOF MS (MALDI: *Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization* – Desorpcja/Jonizacja laserem wspomagana matrycą; TOF: *Time of Flight* – Pomiar czasu przelotu jonów; MS: *Mass Spectrometry* – Spektrometria masowa). Metoda pozwala na identyfikację drobnoustrojów na podstawie analizy profilu białek unikatowych dla danego mikroorganizmu. Otrzymane widma białek porównywane są ze stale aktualizowaną biblioteką widm, a określenie gatunku drobnoustroju trwa do 5 minut. Metodę stosowano m.in. do identyfikacji mikroorganizmów izolowanych ze zbiorów bibliotecznych⁹⁴. Pewnym problemem przy identyfikacji drobnoustrojów środowiskowych jest jednak ograniczony zasób bazy danych profili białkowych mikroorganizmów (baza danych opiera się głównie na profilach białkowych mikroorganizmów patogennych) oraz to, że grzyby pleśniowe mogą mieć zmienny skład białkowy – zależny od podłoża, na jakim rosną.

Identyfikacja mikroorganizmów metodami genetycznymi

Najdokładniejsza z metod – identyfikacja genetyczna – opiera się na ustalaniu sekwencji hiperzmiennych regionów genów markerowych. Sekwencje genów markerowych stanowią tzw. odcisk palca mikroorganizmu – zapis genetyczny charakterystyczny dla danego gatunku. W przypadku bakterii jest to fragment genu 16S rDNA (sekwencje genu kodującego komponent 30S małej podjednostki prokariotycznych rybosomów). Dla grzybów takich regionów jest kilka – regiony kodujące elementy strukturalne rybosomu: 18S; 5,8S; 28S oraz wewnętrzne regiony niekodujące ITS1 i ITS2 (ang. *internal transcribed spacer*). Geny markerowe wykorzystywane są zarówno do identyfikacji mikroorganizmów wyizolowanych metodami hodowlanymi, jak i z pominięciem tego etapu, dzięki zastosowaniu takich technologii, jak sekwencjonowanie

⁹³ E. Caselli, S. Pancaldi, C. Baldissarro, F. Petrucci, A. Impallaria, L. Volpe, M. D'Accolti, I. Soffritti, M. Coccagna, G. Sassu, F. Bevilacqua, A. Volta, M. Bisi, L. Lanzoni, S. Mazzacane, *Characterization of Biodegradation in a 17th Century Easel Painting and Potential for a Biological Approach*, „PLoS ONE” 2018, nr 13(12), e0207630, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207630>.

⁹⁴ L. Krakova, K. Soltys, A. Otlewska, K. Pietrzak, S. Purkrtova, D. Savicka, A. Puscarova, M. Buckova, T. Szemes, J. Budis, K. Demnerova, B. Gutarowska, D. Pangallo, *Comparison of Methods for Identification of Microbial Communities in Book Collections: Culture-Dependent (Sequencing and MALDI-TOF MS) and Culture-Independent (Illumina MiSeq)*, „International Biodeterioration & Biodegradation” 2018, nr 131, s. 51–59, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.015>.

nowej generacji (NGS). Analizy metagenomiczne z wykorzystaniem NGS znalazły szerokie zastosowanie do identyfikacji całych konsorcjów mikroorganizmów zasiedlających dane środowisko. Badania przeprowadzone w Rotundzie św. św. Feliksa i Adaukta, najstarszej budowli na Wzgórzu Wawelskim, wykazały, że mikrobiom (konsorcjum mikroorganizmów) zasiedlający ściany budowli jest silnie endemiczny. Wśród zidentyfikowanych taksonów wysoki udział stanowiły mikroorganizmy, których jeszcze nie poznano, czyli nie wyizolowano ich do tej pory metodami hodowlanymi⁹⁵. Wysokoprzepustowe metody sekwencjonowania (metody omiczne) pozwalają nie tylko na identyfikację mikroorganizmów w złożonych konsorcjach (ang. *metabarcoding*), lecz także na określenie ich aktywności metabolicznych (metabolomika) bez konieczności izolowania mikroorganizmów na podłożach mikrobiologicznych. Wszystkie analizy opierają się wyłącznie na analizie materiału genetycznego⁹⁶.

KLASYFIKACJA ZANIECZYSZCZENIA MIKROBIOLOGICZNEGO POWIERZCHNI

Obecnie, nie ma norm określających dopuszczalne poziomy zanieczyszczenia mikrobiologicznego powierzchni (podobnie jak powietrza – zob. podrozdział „Zanieczyszczenie mikrobiologiczne powietrza”) w instytucjach opiekujących się zbiorami zabytkowymi, bibliotecznymi czy archiwalnymi. Nie ma również wytycznych dotyczących metodologii pobierania próbek z takich powierzchni. Propozycje normatywów określających stan higieniczny powierzchni pomieszczeń mieszkalnych czy użyteczności publicznej zanieczyszczonych zarodnikami grzybów, są opracowywane (nie zostały jeszcze opublikowane) przez Zespół Ekspertów z Centralnego Instytutu Ochrony Pracy⁹⁷. W tabeli 6 przedstawiłam proponowane zakresy wartości 5-stopniowej skali oceny czystości powierzchni, które przytoczyłam, powołując się na propozycje australijskie⁹⁸. Propozycje nie uwzględniają rodzaju izolowanych z powierzchni grzybów pleśniowych. Przedstawione dane mogą jednak stanowić punkt wyjścia do interpretacji ilościowych wyników analiz skażenia powierzchni i są zbliżone do praktykowanej w LKZB BN oceny ilościowej skażenia zbiorów na podłożu papierowym.

⁹⁵ M. Dyda, A. Pyzik, E. Wilkojc, B. Kwiatkowska-Kopka, A. Skłodowska, *Bacterial and Fungal Diversity Inside the Medieval Building Constructed with Sandstone Plates and Lime Mortar as an Example of the Microbial Colonization of a Nutrient-Limited Extreme Environment (Wawel Royal Castle, Krakow, Poland)*, „Microorganisms”, nr 7(10), s. 416, <https://doi.org/10.3390/microorganisms7100416>.

⁹⁶ B. Perito, D. Cavalieri, *Innovative Metagenomic Approaches for Detection of Microbial Communities Involved in Biodeterioration of Cultural Heritage*, IOP Conference Series Materials Science and Engineering 2018, nr 364(1), 012074, DOI: 10.1088/1757-899X/364/1/012074.

⁹⁷ Międzyresortowa Komisja ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. *Czynniki szkodliwe w środowisku pracy – wartości dopuszczalne*, CIOP-PIB, Warszawa 2018, https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P25000149031403773780227&html_tresc_root_id=405&html_tresc_id=325&html_klucz=405&html_klucz_spis=405.

⁹⁸ P. Kemp, H. Neumeister-Kemp, *Australian Mould Guideline: The Go-To Guide for Everything Mould* (2nd Edition), Messenger Publishing, Sydney 2010.

Bogdan Filip Zerek, na podstawie swojej wieloletniej praktyki, zaproponował skalę szacowania zanieczyszczenia mikrobiologicznego powierzchni obiektów bibliotecznych i archiwalnych⁹⁹. Dla ujednolicenia oceny ilościowej ze skalą przedstawioną w tabeli 5, propozycje opracowane przez ekspertów Biblioteki Narodowej podałam w przeliczeniu na jtk/cm². Jest to skala opracowana dla metodyki stosowanej w BN dla próbek pobranych metodą wymazu, której czułość (poziom detekcji, czyli wynik, jaki uzyskamy przy izolacji jednej kolonii mikroorganizmu na szalce z próbki pobranej z 25 cm²) to 0,8 jtk/cm². Dla porównania czułość metody opisanej w podrozdziale „Pobieranie próbek metodą wymazu” to 0,4 jtk/cm² przy zawieszeniu próbki w 2 ml roztworu soli fizjologicznej (lub 0,2 jtk/cm² przy zawieszeniu próbki w 1 ml płynu), a czułość metody odcisku sterylną bibułą to 0,04 jtk/cm² (zob. podrozdział „Pobieranie próbek metodą odcisku sterylną bibułą Whatmana”).

Tabela 6. Propozycje normatywów określających stan higieniczny powierzchni pomieszczeń mieszkalnych lub użyteczności publicznej zanieczyszczonych zarodnikami grzybów

Stężenie żywych spor grzybów na powierzchni (jtk/cm ²)	Ocena higieniczna
<0,5	niskie zanieczyszczenie
0,5–1	normalne zanieczyszczenie
1–2,5	podwyższone zanieczyszczenie
>2,5	powierzchnia zanieczyszczona
>12,5	skrajne zanieczyszczenie

Źródło: M. Pośniak (red.), *Międzyresortowa Komisja ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. Czynniki szkodliwe w środowisku pracy – wartości dopuszczalne*, CIOP-PIB, Warszawa 2018, https://www.ciop.pl/CIOPortalWAR/appmanager/ciop/pl?_nfpb=true&_pageLabel=P25000149031403773780227&html_tresc_root_id=405&html_tresc_id=325&html_klucz=405&html_klucz_spis=405; P. Kemp, H. Neumeister-Kemp, *Australian Mould Guideline: The Go-To Guide for Everything Mould* (2nd Edition), Messenger Publishing, Sydney 2010.

Tabela 7. Ocena ilościowa czystości mikrobiologicznej obiektów archiwalnych i bibliotecznych

Poziom zanieczyszczenia mikrobiologicznego (jtk/cm ²)	Interpretacja wyników
0–0,5	niskie zanieczyszczenie
0,5–15	umiarkowane zanieczyszczenie
>15	wysokie zanieczyszczenie

Źródło: B.F. Zerek, *The Preservation and Protection of Library Collections: A Practical Guide to Microbiological Controls*, Elsevier, Oxford 2014.

⁹⁹ B.F. Zerek, *The Preservation...*, dz. cyt.

W LKZB BN ocenę ilościową zanieczyszczenia mikrobiologicznego obiektów łączy się z oceną jakościową, a obiekty przyporządkowywane są do jednej z 5 klas czystości:

- **Klasa 1:** obiekt mikrobiologicznie czysty (brak wzrostu mikroorganizmów na szal-
kach), nie wymaga dezynfekcji;
- **Klasa 2:** obiekt mikrobiologicznie czysty, po wykonaniu jednej dezynfekcji (przed de-
zynfekcją z powierzchni obiektu wyizolowano mikroorganizmy);
- **Klasa 3:** obiekt stabilny mikrobiologicznie, nie wymaga dezynfekcji. Obejmuje obiek-
ty, z powierzchni których izolowano nieliczne mikroorganizmy, lecz ze względu na
właściwości obiektu (lub technologię wykonania) dezynfekcja nie jest konieczna lub
jest niemożliwa (zbyt niebezpieczna dla zachowania obiektu);
- **Klasa 4:** obiekt stabilny mikrobiologicznie, nie wymaga kolejnych dezynfekcji. Odnosi
się do obiektów, z których izolowano mikroorganizmy nawet po 4-krotnych proce-
sach dezynfekcji, lecz – na podstawie ich charakterystyki – dalsza dezynfekcja nie
jest konieczna;
- **Klasa 5:** obiekt stabilny mikrobiologicznie, nie wymaga dezynfekcji ani pobierania
próbek. Odnosi się do obiektów bez widocznych zmian stanu zachowania.

Doświadczenia naszej (typowo mikrobiologicznej) grupy badawczej zaowocowały nieco inną klasyfikacją czystości mikrobiologicznej obiektów. Klasyfikacja odnosi się do obiektów, których nie mogliśmy zobaczyć, a jedynie otrzymaliśmy próbki do analiz:

- 1) obiekty, z powierzchni których nie izolowano kolonii grzybów pleśniowych są kwalifikowane do **obektów czystych mikrobiologicznie**; ze wskazaniem do użytkowania bez specjalnych wymogów;
- 2) obiekty, z powierzchni których izolowano bakterie, drożdżaki czy niechorobotwórcze grzyby pleśniowe oraz grzyby, które nie stanowią zagrożenia dla obiektów papierowych w liczebności do 2,5 jtk/cm² są kwalifikowane do **obektów stabilnych mikrobiologicznie**; ze wskazaniem do używania w środkach ochrony osobistej i wydzielonych pomieszczeniach. Zaleceniem jest odkurzenie obiektu lub ewentualna dezynfekcja (na podstawie dostępności danych dotyczących technologii wykonania i stanu zachowania);
- 3) obiekty, z powierzchni których były izolowane grzyby pleśniowe o wysokim potencjale deterioracyjnym (nawet jedna kolonia) oraz takie, z powierzchni których były izolowane grzyby pleśniowe o potencjale chorobotwórczym są kwalifikowane do **obektów skażonych mikrobiologicznie**. Do tej grupy klasyfikowane są również obiekty, z powierzchni których izolowano grzyby pleśniowe w ilości powyżej 2,5 jtk/cm². Dla obiektów zaklasyfikowanych do tej grupy wskazana jest dezynfekcja oraz dezynfekcja obiektów z nimi sąsiadujących.

ANALIZY CZYSTOŚCI MIKROBIOLOGICZNEJ POWIERZCHNI – ALTERNATYWY DLA METOD HODOWLANYCH

Oprócz analiz opartych na hodowli mikroorganizmów istnieje wiele metod oznaczających skażenie mikrobiologiczne powierzchni pośrednio – na podstawie określenia stężenia niektórych związków charakterystycznych dla mikroorganizmów.

Jedną z nich jest metoda wykorzystująca luminometryczne pomiary stężenia ATP (adenozyno-5'-trifosforan) – związku występującego w cytoplazmie komórek żywych (bakterii, grzybów, roślin, bezkręgowców i zwierząt kręgowych). Do zalet metody można zaliczyć niski koszt, uzyskanie wyniku już po niespełna minucie od pobrania materiału do badań (jeżeli analiza wykonywana jest zgodnie z procedurą producenta), oraz to, że nie wymaga specjalistycznej wiedzy czy wyposażenia laboratorium. Do wad metody należą: niespecyficzność (metoda nie pozwoli na odróżnienie zanieczyszczenia powierzchni mikroorganizmami czy złuszczonego naskórkiem), dość niska powtarzalność i brak standaryzacji metody dla analiz obiektów zabytkowych. Szczególnie niespecyficzność sprawia, że otrzymane wyniki są trudne do interpretacji w kontekście ochrony zbiorów. Przykładowo, wysokie odczyty pomiarów luminometrycznych ATP powierzchni często wynikają z obecności mikroorganizmów zasiedlających ludzką skórę, czy wręcz fragmentów naskórka naniesionych na powierzchnię obiektu w trakcie prac konserwatorskich. Niemniej jednak metoda znalazła szerokie zastosowanie w przemyśle, do określania czystości powierzchni wytwarzania produktów leczniczych, kosmetyków czy w przemyśle spożywczym. Przykładowy luminometr i wymazówki kompatybilne z urządzeniem przedstawiono na zdjęciu (Ryc. 30).

Metoda może się jednak sprawdzić do porównywania poziomów stężenia ATP przed i po dezynfekcji; weryfikacji czystości powierzchni obiektu przed i po wypożyczeniu, a także do weryfikacji, czy dana zmiana kolorystyczna na obiekcie może wynikać z obecności organizmów żywych na jego powierzchni. W ostatnim przypadku pomiar poziomu ATP należy wykonać dla miejsca zmienionego kolorystycznie, a otrzymany wynik porównać z wynikiem pomiaru uzyskanym dla tego samego obiektu, z miejsca bez widocznych zmian. Metoda może też znaleźć zastosowanie do „przesiewowego” typowania obiektów do analiz mikrobiologicznych metodami hodowlanymi.

Tak jak w przypadku analiz powietrza, również do badania obecności mikroorganizmów na powierzchniach stosuje się analizy związków charakterystycznych dla grzybów pleśniowych: β -N-acetylhexosaminidazy (NAHA)¹⁰⁰ czy ergosterolu w materiale (metoda niszcząca)¹⁰¹.

¹⁰⁰ Y.D. Aktas, I. Ioannou, H. Altamirano, M. Reeslev, D. D'Ayala, N. May, M. Canales, *Surface and Passive/Active Air Mould Sampling: A Testing Exercise in a North London Housing Estate*, „Science of the Total Environment” 2018, nr 643, s. 1631–1643, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.311>.

¹⁰¹ B. Gutarowska, *Grzyby...*, dz. cyt.

Ryc. 30. Luminometr oraz wymazówki do pobierania próbek w celu określenia stężenia ATP na powierzchni. Na zdjęciu wymazówki przed wykonaniem pomiaru (8 szt.) oraz próbka po pomiarze luminometrycznym (1 szt., wynik pomiaru widoczny na wyświetlaczu urządzenia). Fot. M. Dydą



Na rynku dostępne są przenośne zestawy do wykonywania szybkich testów fluorometrycznych na obecność NAHA na powierzchni¹⁰², oparte na tej samej zasadzie, co pomiary NAHA w powietrzu. Do oznaczania obecności grzybów pleśniowych na powierzchniach materiałów budowlanych wykorzystuje się także zjawisko bioluminescencji charakterystyczne dla niektórych grzybów pleśniowych¹⁰³.

DOBRE PRAKTYKI – ANALIZY MIKROBIOLOGICZNE POWIERZCHNI

Najważniejszym działaniem zapobiegawczym na rzecz ochrony obiektów przed działaniem mikroorganizmów, obok kontroli i utrzymywania odpowiednich parametrów klimatu, jest ograniczanie kumulacji zanieczyszczeń na powierzchniach obiektów oraz systematyczne usuwanie

¹⁰² <https://www.mycometer.com/products/mycometer-surface/about-mycometer-surface/>.

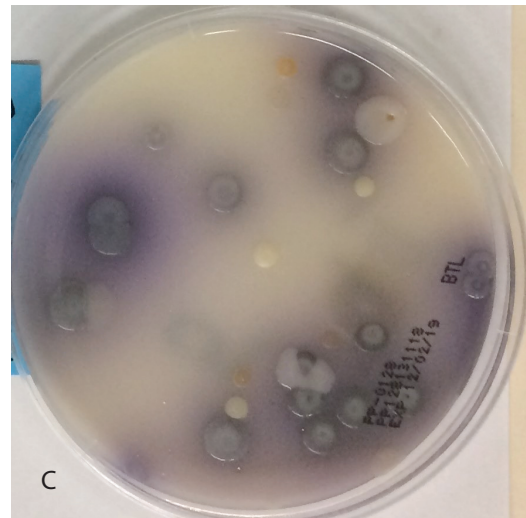
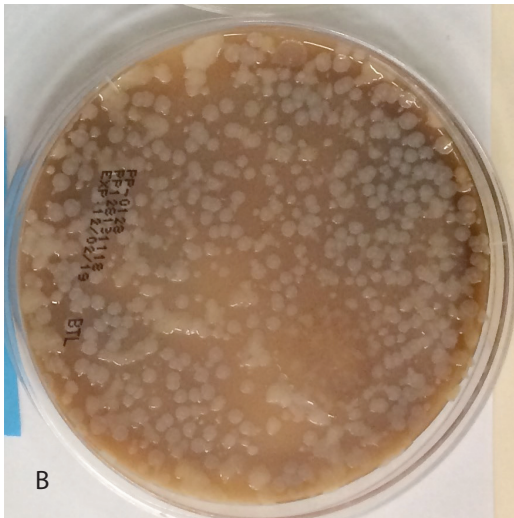
¹⁰³ D. Horbik, *Oznaczanie grzybów pleśniowych na powierzchni materiału i ocena oddziaływania grzybów na materiał budowlany*, „Przegląd Budowlany” 2019, nr 6, s. 20–25.

zdeponowanych zanieczyszczeń (zob. podrozdział „Dobre praktyki – zanieczyszczenie mikrobiologiczne powietrza”). Szczególnie podatne na zanieczyszczenia są obiekty ekspozycyjne horyzontalnie lub posiadające powierzchnie płaskie poziome (meble, ceramika, tkaniny leżące, górne krawędzie obiektów wiszących, ramy).

- W zależności od typu materiału powierzchnie obiektów należy czyścić za pomocą materiałów z mikrofibry oraz/lub odkurzaczy z filtrami HEPA lub filtrem wodnym. Istotne przy tym jest rygorystyczne przestrzeganie zasad BHP i utrzymywanie wilgotności względnej powietrza na poziomie RH poniżej 60%. Personel danej instytucji powinien powiadamiać opiekuna zbiorów o każdej niepokojącej zmianie na powierzchni obiektów, wyposażenia czy elementach budowlanych, wykończeniowych (zasady dotyczące utrzymywania czystości powierzchni zabytkowych zebrano w podrozdziale „Dobre praktyki – zanieczyszczenie mikrobiologiczne powietrza”).
- W ramach prewencji warto okresowo badać czystość mikrobiologiczną kolekcji dla obiektów z widocznymi zmianami, a nawet pozycji losowo wybranych ze zbioru. Takie badania należałoby wykonywać co 5–10 lat dla większej liczby obiektów. Warto podkreślić, że pomimo dezynfekcji zbioru może dojść do wtórnego zanieczyszczenia powierzchni obiektów z powietrza – np. w efekcie niesprawnego działania systemu wentylacji. Badania kontrolne powierzchni obiektów pozwolą na systematyczną ocenę stanu kolekcji i ewentualną reakcję na wypadek wykrycia zagrożenia mikrobiologicznego (Ryc. 31A–C).
- Dobrą praktyką jest badanie kolekcji przed przeniesieniem zbiorów do nowej lokalizacji, czy pomieszczenia po remoncie, aby wytypować te obiekty, które są zainfekowane lub zanieczyszczone w wysokim stopniu (oczywiście w celu podjęcia stosowanych działań – dezynfekcja/oczyszczanie mechaniczne). Oprócz badań okresowych, dobrą praktyką jest sprawdzanie pod względem mikrobiologicznym obiektów w salach, w których odnotowano wysokie, utrzymujące się poziomy wilgotności powietrza, lub w których doszło do zainfekowania i/lub skażenia mikrobiologicznego powierzchni przegród budowlanych czy wentylacji. Również wskazane jest, aby okresowo lub w przypadku podejrzenia skażenia wykonywać analizy mikrobiologiczne dla wylotów wentylacji, filtrów, nawilżaczy powietrza, mebli czy przegród budowlanych.
- Analizy mikrobiologiczne dobrze jest wykonywać dla obiektów, które poddane zostały dezynfekcji, aby zweryfikować skuteczność procesu. Z doświadczeń LKZB BN wynika, że niektóre gatunki grzybów strzępkowych, mogą przetrwać na powierzchniach nawet po 3–4-krotnym procesie dezynfekcji tlenkiem etylenu¹⁰⁴. Kontrolę skuteczności dezynfekcji warto przeprowadzać niezależnie od materiału, z jakiego wykonano obiekt czy zastosowanej metody. Najlepiej, kiedy takie analizy wykonuje instytucja niezależna od instytucji przeprowadzającej dezynfekcję (wyjątek, ze względu na wysokie standardy i obowiązujące

¹⁰⁴ B.F. Zerek, *The Preservation...*, dz. cyt.

Ryc. 31. Przebarwienia na powierzchni zabytkowej rzeźby kamiennej (A) oraz wyizolowane kolonie bakterii odbarwiające podłoże z węglanem wapnia (B, C).
Fot. M. Dyda



procedury, stanowi LKZB BN, które wykonuje zarówno dezynfekcję, jak i badania mikrobiologiczne obiektów).

- W przypadku planowanej dezynfekcji dużego zasobu archiwalnego lub bibliotecznego poza instytucją, warto upewnić się, czy wykonawca dysponuje wydzielonymi pomieszczeniami dla zbiorów przyjmowanych do dezynfekcji (strefa brudna). Należy zwrócić uwagę, czy są wydzielone pomieszczenia dla obiektów bezpośrednio po dezynfekcji (pomieszczenie kwarantanny) i dla zbiorów z potwierdzoną przez analizy mikrobiologiczne skutecznością procesu dezynfekcji (pomieszczenie czyste). Wydzielenie stref „brudnych” i „czystych” zwiększa bezpieczeństwo zbiorów przed krzyżową kontaminacją. We wszystkich pomieszczeniach RH powinna być utrzymywana na poziomie poniżej 60%.

- Analizy mikrobiologiczne należy również wykonywać dla obiektów włączanych do kolekcji, aby zapobiec ewentualnemu skażeniu zbiorów. Obiekty włączane do kolekcji trzeba poddać kwarantannie w wydzielonym pomieszczeniu do momentu otrzymania potwierdzenia, że są mikrobiologicznie czyste. Jeżeli wyniki analiz wykażą zanieczyszczenia mikrobiologiczne, należy przed włączeniem do kolekcji oczyścić mechanicznie te obiekty, które nie posiadają widocznych zmian stanu zachowania, lub poddać dezynfekcji obiekty skażone, z widocznymi zmianami. Po dezynfekcji lub odkurzeniu trzeba powtórnie wykonać analizy, aby zweryfikować skuteczność podjętych działań.
- Podobną procedurę warto wprowadzić dla obiektów wypożyczanych. Analizy mikrobiologiczne wykonane przed i po powrocie obiektu pozwalają ustalić, czy w trakcie wypożyczenia obiekt nie uległ zanieczyszczeniu. Takie procedury wypożyczania obiektu posiada np. Muzeum Narodowe w Warszawie. Jeżeli obecność mikroorganizmów nie zostanie stwierdzona, obiekt po powrocie możemy bez obaw umieścić w magazynie czy na ekspozycji. W innym wypadku wskazane jest oczyszczenie i/lub dezynfekcja obiektu. Można rozważyć, czy nie zastrzec w umowie wypożyczenia pokrycia kosztów analiz mikrobiologicznych i ewentualnej dezynfekcji obiektu przez instytucję wypożyczającą.
- Oprócz weryfikacji zanieczyszczenia mikrobiologicznego zbiorów wskazane jest okresowe badanie stanu sanitarnego powietrza w pomieszczeniach, w których przechowywane są zbiory (zob. podrozdział „Dobre praktyki – zanieczyszczenie mikrobiologiczne powietrza”). Jest to podyktowane prostą zasadą – to, co znajduje się w powietrzu, ulega sedymentacji i osiada na powierzchniach. Kontrolując jakość powietrza, jesteśmy w stanie w odpowiednim momencie wdrożyć działania naprawcze (np. instalacja oczyszczaczy powietrza, wymiana filtrów w wentylacji) i zapobiec ewentualnemu skażeniu obiektów (np. w efekcie skażenia wentylacji). W przypadku wysokiego skażenia mikrobiologicznego powietrza wskazane jest przeprowadzanie analiz mikrobiologicznych dla grupy obiektów wytypowanej na podstawie oceny wizualnej. Ograniczenie ilości deponowanych na powierzchniach zanieczyszczeń można obniżyć przez ograniczanie wymiany powietrza z powietrzem zewnętrznym (ograniczenie wietrzenia, sprawny system HVAC, wydajne filtry w wentylacji) lub instalację przenośnych oczyszczaczy powietrza wyposażonych w filtry HEPA (szczegółowe uwagi zamieszczono w podrozdziałach „Dobre praktyki – zanieczyszczenie fizykochemiczne powietrza” oraz „Dobre praktyki – zanieczyszczenie mikrobiologiczne powietrza”). Instalując oczyszczacze w pomieszczeniach ekspozycyjnych, wskazane jest przeszkolenie personelu i uruchamianie oczyszczaczy powietrza, w miarę możliwości również w trakcie rutynowych prac porządkowych. W pracowniach konserwatorskich oczyszczacze powietrza powinny być uruchamiane każdorazowo w trakcie prowadzonych prac.
- Kolejny istotny aspekt to analizy środowiska pracy pod kątem identyfikacji szkodliwych czynników biologicznych. Do takich czynników można zaliczyć grzyby z gatunków *Aspergillus fumigatus* czy *Stachybotrys atra*. W przypadku identyfikacji szkodliwych grzybów pleśniowych konieczne jest ustalenie źródła skażenia i jego eliminacja.

Monitoring i dobre praktyki powinny stanowić jeden z elementów strategii „Kompleksowej metodyki postępowania ze skażeniami i zanieczyszczeniami biologicznymi”¹⁰⁵ – „Integrated pest management” (IPM) – w każdej instytucji, która posiada kolekcje muzealne, biblioteczne czy archiwalne. Ze względu na różnorodność zagadnień, działania w zakresie IPM w danej instytucji powinna koordynować wyznaczona do wspomnianego zadania osoba. Tego typu odrębne stanowiska istnieją chociażby w British Muzeum czy Muzeum Pałacu Króla Jana III w Wilanowie (Dział Architektury i Środowiska). Koordynator powinien dysponować odpowiednimi zasobami umożliwiającymi realizację głównych celów IPM¹⁰⁶, do których należą¹⁰⁷:

- 1. Prewencja:** zapobieganie i blokowanie zagrożeń ze strony organizmów żywych.
- 2. Wykrywanie** zagrożeń ze strony organizmów żywych.
- 3. Kontrola zagrożeń:** ograniczanie, eliminacja organizmów żywych.

¹⁰⁵ PN-EN 16790:2016-08 *Kompleksowa metodyka postępowania ze skażeniami i zanieczyszczeniami biologicznymi (IPM) na potrzeby ochrony dziedzictwa kulturowego*; CSN EN 16790:2016 *Conservation of Cultural Heritage – Integrated Pest Management (IPM) for Protection of Cultural Heritage*.

¹⁰⁶ T. Strang, R. Kigawa, *Agent...*, dz. cyt.

¹⁰⁷ A.W. Brokerhof, B. van Zanen, A. den Teuling, *Fluffy Stuff. Integrated Control of Mould in Archives*, Netherlands Institute for Cultural Heritage, Amsterdam 2007.

Eliminacja mikroorganizmów

W kontekście ochrony zabytków eliminacja mikroorganizmów z powierzchni najczęściej określa na jest mianem dezynfekcji. Nie jest to jednak do końca słuszne, ponieważ dezynfekcja stanowi jedynie wycinek metod, które służą **dekontaminacji** powierzchni, a do których zaliczane są¹⁰⁸:

- **Sanityzacja:** usuwanie widocznych zabrudzeń i zanieczyszczeń, a wraz z nimi także większości drobnoustrojów (mycie, odkurzenie);
- **Dezynfekcja:** proces, w wyniku którego ulegają zniszczeniu formy wegetatywne drobnoustrojów, prątki gruźlicy, enterowirusy i niektóre formy przetrwalnikowe;
- **Sterylizacja:** proces prowadzący do zniszczenia wszystkich żywych form drobnoustrojów i ich form przetrwalnych;
- **Antyseptyka:** dezynfekcja skóry, błon śluzowych, uszkodzonych tkanek z zastosowaniem preparatów nie działających szkodliwie na tkanki ludzkie.

Niezależnie od przyjętej nomenklatury procesy dekontaminacji, szczególnie z wykorzystaniem metod fizycznych i chemicznych, nie pozostają obojętne dla obiektu. Wyjątek stanowią metody pasywne czyli zatrzymanie rozwoju mikroorganizmów przez zachowanie odpowiednich warunków przechowywania. Jak słusznie przyjęto w Bibliotece Narodowej,

proces dezynfekcji traktowany jest [...] jako zabieg konserwatorski, co oznacza, że decyzję o dezynfekcji podejmuje konserwator prowadzący prace, albo komisja konserwatorska (decyzji o dezynfekcji obiektów zabytkowych nie może podejmować mikrobiolog). W przypadku pojedynczych obiektów podstawą do takiej decyzji jest wynik badań mikrobiologicznych. Podobnie traktowane są obiekty pochodzące od zleceńodawców zewnętrznych – zalecamy, aby dezynfekcja w komorze BN była elementem procesu konserwatorskiego, a nie decyzji administracyjno-urzędniczej¹⁰⁹.

¹⁰⁸ M. Fleischer, *Dezynfekcja, sterylizacja i antyseptyka* [w:] A. Pietrzyk, M. Wróblewska, P.B. Heczko (red.), *Mikrobiologia lekarska*, PZWL, Warszawa 2014.

¹⁰⁹ B.F. Zerek, J. Piechal, *Ocena skuteczności koreańskiego systemu fumigacji olejkami eterycznymi BIO-MASTER*, „Notes Konserwatorski” 2017, nr 19, s. 85–102.

Dezynfekcja obiektu zabytkowego czy historycznego, podobnie jak zabieg konserwatorski, powinna spełniać 3 podstawowe zasady¹¹⁰:

- 1) powinna być działaniem, które nie ingeruje w strukturę obiektu;
- 2) powinna zostać przeprowadzona metodą odwracalną (dla struktury obiektu, nie mikroorganizmów);
- 3) powinna pozwolić na usunięcie zastosowanych środków.

Skuteczność procesu dezynfekcji zależy od rodzaju mikroorganizmu (lub jego form), czasu działania środka dezynfekującego, stężenia preparatu dezynfekującego lub natężenia sił fizycznych oraz rodzaju metody dezynfekcji. Metody dezynfekcji można podzielić na metody fizyczne, fizyczno-chemiczne lub chemiczne. Dezynfekcji może być poddawany pojedynczy obiekt, zbiór obiektów (dezynfekcja masowa) lub skażone pomieszczenie. Do dezynfekcji pojedynczych obiektów najczęściej stosuje się dezynfekcję chemiczną, fizyczną (czyszczenie laserowe) lub mechaniczne oczyszczanie powierzchni (odkurzanie, czyszczenie), w metodach masowych najczęściej stosowana jest fumigacja tlenkiem etylenu. Dobór metody lub związku chemicznego zależy od budowy technologicznej obiektu.

Ważnym elementem jest weryfikacja skuteczności dezynfekcji: (a) kontrola poprawności przeprowadzanego procesu (z wykorzystaniem np. testów paskowych) oraz (b) kontrola skuteczności procesu (analiza mikrobiologiczna powierzchni obiektu przed i po dezynfekcji).

Metody pasywne polegają na wdrażaniu działań prewencyjnych, które do minimum ograniczają możliwość wzrostu mikroorganizmów. Do tych działań należy monitoring parametrów środowiska i utrzymywanie wilgotności względnej powietrza poniżej 60% oraz systematyczne czynności porządkowe, odkurzanie obiektów, przeglądy kolekcji. Wszystkie działania opisano w podrozdziałach: „Dobre praktyki – zanieczyszczenie fizykochemiczne powietrza”, „Dobre praktyki – zanieczyszczenie mikrobiologiczne powietrza” oraz „Dobre praktyki – analizy mikrobiologiczne powierzchni”. Wdrożenie metod pasywnych ogranicza zarówno rozwój mikroorganizmów, jak i konieczność stosowania dezynfekcji.

Czyszczenie mechaniczne może okazać się jedynym rozwiązaniem, jeżeli dezynfekcja nie jest możliwa do przeprowadzenia ze względu na budowę technologiczną obiektu, a metody pasywne (odpowiednie warunki przechowywania) nie zatrzymały postępujących zniszczeń. Ze względu na narażenie związane z wdychaniem zarodników, strzępek grzybni, lecz również toksyn i związków kancerogennych (szczególnie przy oczyszczaniu manualnym obiektów), przy mechanicznym usuwaniu zanieczyszczeń mikrobiologicznych należy bezwzględnie przestrzegać zasad BHP. Do odkurzania obiektów najlepiej używać odkurzaczy z filtrem wodnym lub

¹¹⁰ B.F. Zerek, *The Preservation...*, dz. cyt.

HEPA. Zarówno odkurzanie, jak i manualne oczyszczanie z wykorzystaniem pędzli, ściereczek z mikrofibry itp. najlepiej wykonywać w wydzielonym pomieszczeniu, z wyodrębnionym systemem wentylacji lub, jeśli gabaryty obiektu na to pozwalają, w komorach z laminarnym przepływem powietrza lub wyciągiem powietrza (z wyjściem poza system wentylacji w budynku lub z filtrem HEPA, jak np. mobilne stanowisko do prac konserwatorskich Spirabilia®). Wszystkie czynności (szczególnie te wykonywane w pomieszczeniu, nie komorze) należy wykonywać w odzieży ochronnej: kombinezon przeciwpyłowy, rękawice jednorazowe, maska całotwarzowa lub półmaska z filtrami klasy P3 lub z pochłaniaczami, gogle. Praca w odzieży ochronnej powinna odbywać w cyklach: 1 h pracy, 30 min przerwy, z możliwością przebrania się w wydzielonym pomieszczeniu i dostępem do pomieszczenia socjalnego.

Oczyszczanie mechaniczne powierzchni księzek z kurzu i osiadłych zarodników może stanowić element działań prewencyjnych. Istnieją już zautomatyzowane, mobilne systemy czyszczące dedykowane dla zbiorów bibliotecznych, np. urządzenie Depulvera® wyposażone w taśmociąg, komorę z systemem czyszczących szczotek i filtr HEPA czy półautomatyczne urządzenie Pulvisinia®. Dodatkowo, można połączyć system Depulvera® z urządzeniem Nebula®, w którym można zdezynfekować materiały archiwalne i biblioteczne poprzez biobójcze działanie QAC, czyli czwartorzędowych soli amoniowych na bazie chlorku benzalkamu zmieszanego z wodą destylowaną. Dokumenty przechodzą przez komorę nebulizacji, w której roztwór dezynfekujący jest rozpylany na wszystkie części zewnętrzne, a następnie obiekty trafiają do komory szybkiego suszenia.

Fumigacja tlenkiem etylenu to jedna z najskuteczniejszych i najbezpieczniejszych metod dezynfekcji dla obiektów na podłożu papierowym. Działanie tlenu etylenu polega na reakcji alkilowania białek oraz DNA. W wyniku dezynfekcji tlenkiem etylenu dochodzi do niszczenia nie tylko stawonogów, mikroorganizmów, lecz także materiału genetycznego i dezynfekowanych obiektów (obiekty historii naturalnej, archeologiczne, szczątki zwierząt, roślin i ludzi). Materiał genetyczny pod wpływem działania EtO ulega modyfikacji, w wyniku której nie ma możliwości przeprowadzenia badań genetycznych materiału poddanego dezynfekcji. Warto o tym pamiętać, planując badania typu ustalanie gatunku zwierzęcia czy ustalenie pokrewieństwa¹¹¹. Tlenek etylenu to bezbarwny gaz cięższy od powietrza, łatwopalny, toksyczny, o właściwościach kancerogennych (z tego względu został wycofany z użycia w Japonii czy Niderlandach). Tlenek etylenu utrzymuje się nawet do 50 dni w papierze żywcowanym. Zaletą metody jest bezspornie brak widocznych efektów na nośniki pisma i celulozę – nie powoduje znaczącego pogorszenia właściwości wytrzymałościowych papieru, zmian pH, obniżenia stopnia polimeryzacji celulozy ani zmian liczby miedziowej. Nie wpływa również na farby drukarskie, olejne, temperowe, akwarelowe i pastelowe, lecz powoduje zmiany barwy warstw malarskich sporządzonych

¹¹¹ A. Michaelsen, F. Pinzari, N. Barbabietola, G. Pinar, *Monitoring the Effects of Different Conservation Treatments on Paper-Infecting Fungi*, „International Biodeterioration & Biodegradation”, nr 84, s. 333–341, DOI: 10.1016/j.ibiod.2012.08.005.

według średniowiecznych receptur z czerwonych barwników roślinnych¹¹². Nie może być stosowany do dezynfekcji obiektów pochodzenia zwierzęcego (reakcja alkilowania białek) oraz metali szlachetnych i półszlachetnych (korozja metali, utlenianie). Ze względu na łatwopalność, do dezynfekcji stosuje się mieszaninę tlenu etylenu z dwutlenkiem węgla (Rotanox; Gaz S-9). W zależności od rodzaju komory, parametry dezynfekcji tlenkiem etylenu mogą być różne. W BN stosowana jest fumigacja tlenkiem etylenu w mieszaninie 1 : 9 z dwutlenkiem węgla w komorze ciśnieniowo-próżniowej. Po zakończeniu procesu dezynfekcji EtO za pomocą pompy próżniowej kierowany jest do katalitycznego spalania w obecności platyny (w efekcie powstaje dwutlenek węgla i woda, które są uwalniane do atmosfery)¹¹³. Czasy ekspozycji stosowane w BN – do 999 min, maksymalne stężenie tlenu etylenu do 522 mg/litr¹¹⁴. Warto również podkreślić, że istnieją gatunki grzybów strzępkowych, które przeżywają nawet 3–4-krotne procesy dezynfekcji tlenkiem etylenu¹¹⁵. Dlatego, oprócz kontroli przebiegu procesu dezynfekcji, dobrze jest zweryfikować jego skuteczność, wykonując analizy mikrobiologiczne powierzchni obiektów. Warto takie analizy zlecić instytucji niezależnej od instytucji przeprowadzającej dezynfekcję. Alternatywą dla dezynfekcji EtO jest dezynfekcja z wykorzystaniem tlenu propylenu, który jest 10-krotnie mniej toksyczny niż tlenek etylenu, choć równie łatwopalny i kancerogenny. Dezynfekcja obiektów z wykorzystaniem tlenu propylenu nie jest obecnie dostępna w kraju.

Dezynfekcja radiacyjna to kolejna metoda dezynfekcji oparta na działaniu sił fizycznych. Promieniowanie gamma (promieniowanie elektromagnetyczne o wysokiej energii) jest skuteczne w likwidacji zarówno plech pleśni, jak i form przetrwalnych – spor, bakterii, wirusów oraz stonogów. Zastosowanie metody dezynfekcji radiacyjnej na rzecz ochrony zabytków szeroko opisano w monografii Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej – MAEA (ang. *International Atomic Energy Agency* – IAEA). W dalszej części, kilka najważniejszych informacji z tej publikacji.

Promieniowanie gamma powoduje bezpośrednie modyfikacje DNA w komórkach mikroorganizmów, uniemożliwiając ich namnażanie oraz oddziałuje pośrednio, powodując modyfikacje w komórce za pośrednictwem rodników hydroksylowych. Z tego powodu nie należy poddawać napromienianiu obiektów, dla których planowane jest przeprowadzenie analizy DNA. Barwniki pochodzenia roślinnego i zwierzęcego (karmina) są bardziej podatne na odbarwienie pod wpływem promieniowania niż nieorganiczne pigmenty. Kolejne materiały, które ulegają odbarwieniu to szkło i niektóre werniksy. Kolagen jest z kolei dość odporny na promieniowanie gamma – przy dawkach promieniowania do 10 kGy (kiloGray) nie obserwowano widocznych zmian estetycznych obiektów skórzanych, pergaminu czy zmian kolorystycznych fotografii żelatynowo-srebranych. Niektóre polimery są odporne nawet na wysokie dawki

¹¹² J. Karbowska-Berent, *Dezynfekcja chemiczna zabytków na podłożu papierowym – skuteczność i zagrożenia*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń 2014.

¹¹³ A. Tymińska, *Przebieg procesu dezynfekcji zbiorów z zastosowaniem tlenu etylenu w Bibliotece Narodowej*, „Notes Konserwatorski” 2002, nr 6, s. 136–142.

¹¹⁴ B.F. Zerek, J. Piechal, *Ocena...*, dz. cyt.

¹¹⁵ B.F. Zerek, *The Preservation...*, dz. cyt.

promieniowania. Do takich należą: polistyren, polietylen, politereftalan etylenu (PET), poliamidy. Inne polimery, jak: azotan celulozy, politetrafluoroetylen, polichlorek winylu, polipropylen i formaldehyd fenolowy są wrażliwe na promieniowanie, nawet przy niskich dawkach. Zauważono różny wpływ promieniowania na materiały pochodzenia roślinnego – lignina ma większą odporność na promieniowanie niż celuloza¹¹⁶. Metoda radiacyjna powoduje nieodwracalne zmiany w łańcuchach celulozy, które kumulują się z każdym kolejnym cyklem dezynfekcji, a przy jednorazowej dawce 10 kGy promieniowanie gamma przyspiesza proces starzenia papieru o co najmniej 50%¹¹⁷. Również wytrzymałość tkanin bawełnianych i lnianych ulegała wyraźnemu obniżeniu przy dawce 10 kGy, a jedwabnych już przy promieniowaniu w dawce 5 kGy. Ponadto zaobserwowano większą podatność na biodegradację bakteryjną próbek tkanin jedwabnych po napromieniowaniu dawką 100 kGy, a także widoczne zmiany powierzchni włókien jedwabnych¹¹⁸.

Zaletą metody jest penetracja w głąb obiektu, niezależnie od rodzaju materiału, krótki czas dezynfekcji, brak pozostałości środka dezynfekującego w obiekcie po zakończeniu procesu, możliwość dezynfekcji obiektu w szczelnym opakowaniu zewnętrznym oraz dość niskie koszty, a także możliwość wykorzystania do dezynfekcji masowej (wielu obiektów jednocześnie). Pomimo negatywnego efektu na niektóre z materiałów, metodę wykorzystano na przestrzeni lat do dezynfekcji takich obiektów, jak: mumia Ramzesa II (w 1977 r.), taśmy filmowe, młody mamut liczący ponad 50 000 lat (znaleziony w 2008 r. w zmarzlinie na terenie Rosji), polichromowane rzeźby i meble, obiekty archiwalne, księgozbiory, obiekty ceramiczne, pergaminowe oraz silnie zainfekowane mykologicznie buty ze zbiorów Państwowego Muzeum na Majdanku¹¹⁹.

Czyszczenie laserowe to metoda fizyczna pozwalająca na precyzyjne usunięcie nawarstwień z powierzchni obiektu. Wykorzystuje zjawisko ablacji laserowej – odparowanie materiału z powierzchni ciała stałego do stanu gazowego, z pominięciem stanu ciekłego. Proces ablacji powstaje w wyniku absorpcji promieniowania laserowego (w powstałej, wysokotemperaturowej plazmie). Absorpcja promieniowania zależy od długości fali, mocy lasera, czasu trwania impulsu oraz od fizycznych i chemicznych właściwości absorpcyjnych materiału. Właściwości absorpcyjne z kolei warunkują efekty fotochemiczne działania lasera oraz siłę odbicia akustycznej fali uderzeniowej powodującej usunięcie zanieczyszczeń. Czyszczenie laserowe jest możliwe również z pominięciem etapu generowania wysokotemperaturowej plazmy dzięki zastosowaniu

¹¹⁶ C.C. Ponta, J.B.G.A. Havermans, Q.K. Tran, L. Cortella, *Chapter 7: Effects of Ionizing Radiation on Materials* [w:] J.L. Boutaine, J.B.G.A. Havermans, C.C. Ponta, Q.K. Tran, P.A.S. Vasquez (red.), *Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation*, IAEA (International Atomic Energy Agency) Radiation Technology Series, nr 6, Vienna 2017, s. 61–85.

¹¹⁷ A.W. Brokerhof, B. van Zanen, A. den Teuling, dz. cyt.

¹¹⁸ W. Machnowski, B. Gutarowska, J. Perkowski, H. Wrzosek, *Effects of Gamma Radiation on the Mechanical Properties of and Susceptibility to Biodegradation of Natural Fibers*. „Textile Research Journal” 2013, nr 83, s. 44–55, DOI: 10.1177/0040517512449045.

¹¹⁹ Chapters 10–26 [w:] J.L. Boutaine, J.B.G.A. Havermans, C.C. Ponta, Q.K. Tran, P.A.S. Vasquez (red.), dz. cyt., s. 113–228.

krótkich impulsów¹²⁰. Metoda bezwzględnie wymaga dostosowania narzędzia (rodzaju lasera i parametrów jego pracy) do materiału, jaki będzie czyszczony. Zły dobór parametrów może spowodować nieodwracalne uszkodzenia powierzchni. Przed rozpoczęciem prac konieczne jest wykonanie prób dla danego obiektu, a doświadczenie ekspertów wykonujących czyszczenie jest nie do przecenienia. Metoda z powodzeniem wykorzystana została do oczyszczania powierzchni kamiennych, polichromii na drewnie czy nici z oplotem z blaszki metalowej¹²¹.

Ze względu na narażenie operatora lasera na oddziaływanie promieniowania laserowego oraz pyłów powstających w trakcie czyszczenia powierzchni, miejsce pracy z wykorzystaniem lasera powinno zostać odpowiednio oznaczone i zabezpieczone. Zgodnie z wymogami BHP operator lasera powinien pracować w odzieży ochronnej, w tym w masce przeciwpyłowej i goglach o odpowiedniej wartości gęstości optycznej dla promieniowania¹²².

Dezynfekcja plazmą niskotemperaturową to metoda, która jest stosowana w przemyśle spożywczym i farmaceutycznym, w oczyszczaczach powietrza, a od kilku lat jest również testowana pod kątem możliwości wykorzystania w ochronie obiektów zabytkowych. „Zimna plazma” to zjonizowany gaz, który powstaje pod wpływem wyładowań elektrycznych wysokiej częstotliwości. Charakteryzuje się wysoką koncentracją cząstek naładowanych (elektronów i głównie jonów dodatnich), wolnych rodników i atomów, wzbudzonych atomów i molekuł oraz promieniowania (w tym zakresu UV i VUV). W kontakcie z powierzchnią zimna plazma powoduje jej modyfikację¹²³. Metodę zastosowano m.in. do dezynfekcji książek. Wydajność dezynfekcji zależała od rodzaju badanego mikroorganizmu – metoda miała silniejsze działanie bakteriostatyczne niż grzybobójcze, była mniej wydajna wewnątrz książki i powodowała zmiany wytrzymałościowe papieru (wzmocnienie). Podobne działanie zaobserwowano w przypadku zastosowania nanocząsteczek srebra oraz olejków eterycznych¹²⁴. W przypadku tkanin obserwowano odbarwienie i mikro zniszczenia powierzchni włókien, a działanie zimnej plazmy pozwoliło jedynie na 4-krotne obniżenie liczebności mikroorganizmów na powierzchni tkanin¹²⁵.

¹²⁰ A. Koss, J. Marczak, *Application of Lasers in Conservation of Monuments and Works of Art*, Oficyna Drukarska, Warszawa 2005.

¹²¹ A. Koss, J. Marczak, M. Strzelec, *Badania Naukowe zastosowań laserów w konserwacji dzieł sztuki – postery*, Oficyna Drukarska, Warszawa 2010.

¹²² A. Koss, J. Marczak, *Lasery w konserwacji dzieł sztuki i zabytków. Zasady – eksploatacja – bezpieczeństwo*, Międzyuczelniany Instytut Konserwacji i Restauracji Dzieł Sztuki, Akademia Sztuk Pięknych w Warszawie i Krakowie 2015.

¹²³ R. Tiño, K. Vizárová, F. Krčma, *Chapter 11: Plasma Surface Cleaning of Cultural Heritage Objects* [w:] G. Lazzara, R. Fakhruddin (red.), *Nanotechnologies and Nanomaterials for Diagnostic, Conservation, and Restoration of Cultural Heritage*, „Advanced Nanomaterials” 2019, s. 239–275, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813910-3.00011-2>.

¹²⁴ K. Pietrzak, A. Otlewska, D. Danielewicz, K. Dybka-Stępień, D. Pangallo, L. Krakova, A. Puškárová, M. Bučková, V. Scholtz, M. Đurovič, B. Surma-Ślusarska, K. Demnerova, B. Gutarowska, *Disinfection of Archival Documents Using Thyme Essential Oil, Silver Nanoparticles Misting and Low Temperature Plasma*, „Journal of Cultural Heritage” 2017, nr 24, s. 69–77, DOI: 10.1016/j.culher.2016.10.011.

¹²⁵ J. Szulc, W. Urbaniak-Domagala, W. Machnowski, H. Wrzosek, K. Łącka, B. Gutarowska, *Low Temperature Plasma for Textiles Disinfection*, „International Biodeterioration & Biodegradation” 2018, nr 131, s. 97–106, <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.01.021>.

Dezynfekcja z wykorzystaniem olejków eterycznych wykorzystywana jest obecnie w systemach do masowej dezynfekcji zbiorów (urządzenie BIO-MASTER; Biomist Technology Co) oraz zamgławiania pomieszczeń (Ultra-Pel®). Fumiganty to mieszanki 100% naturalnych olejków ziołowych, dzięki czemu jest to metoda bezpieczna dla człowieka i przyjazna dla środowiska. Ekspersi Biblioteki Narodowej w Warszawie przeprowadzili testy skuteczności procesu dezynfekcji z wykorzystaniem komory BIO-MASTER, model BM-60AC, która znajduje się w Bibliotece Uniwersyteckiej w Wilnie. Testy prowadzono dla próbek papieru infekowanych różnymi gatunkami grzybów pleśniowych. Niestety „system BIO-MASTER okazał się całkowicie nieskuteczny, a w pojedynczych przypadkach (układach grzyb/papier) wręcz stymulujący wzrost badanych grzybów”¹²⁶. Metodę dezynfekcji z wykorzystaniem olejków eterycznych można zatem uznać za nieskuteczną w walce z grzybami pleśniowymi.

Nanocząsteczki srebra (AgNP) i tlenku magnezu to stosunkowo nowe metody ochrony obiektów zabytkowych przed działaniem mikroorganizmów. Nanocząsteczki tlenku magnezu stanowią obiecującą metodę prewencji dla obiektów wykonanych na podłożu celulozowym. Rozprowadzenie nanocząsteczek tlenku magnezu na powierzchni papieru wykazuje właściwości hamujące aktywność celulolityczną grzybów pleśniowych oraz ma właściwości grzybobójcze¹²⁷. Z kolei nanocząsteczki srebra wykazują silniejsze działanie bakteriobójcze, niż grzybobójcze dla papieru¹²⁸ oraz bakteriostatyczne i hamujące rozwój pleśni na powierzchni tkanin bawełnianych¹²⁹. Skuteczność metody sprawdzono również dla oryginalnych tkanin archeologicznych¹³⁰. Jak wykazały badania, mechanizm działania AgNP w komórce grzyba jest wielokierunkowy i obejmuje: znaczne reorganizacje struktur wewnątrzkomórkowych, plazmolizę, zwiększoną wakuolizację, gromadzenie się materiału lipidowego, skondensowane mitochondria, rozpad organelli, jak również kondensację i fragmentację chromatyny¹³¹. W związku ze zmianami, jakie nanocząsteczki srebra wywołują w komórkach grzybów, konieczne jest zbadanie efektu działania nanocząsteczek metali na organizmy zwierzęce (w szczególności ssaki) oraz ustalenie zasad bezpiecznej pracy z nanomateriałami¹³².

¹²⁶ B.F. Zerek, J. Piechal, *Ocena...*, dz. cyt., s. 100.

¹²⁷ I. Franco Castillo, E. García Guillén, J.M. de la Fuente, F. Silva, S.G. Mitchell, *Preventing Fungal Growth on Heritage Paper with Antifungal and Cellulase Inhibiting Magnesium Oxide Nanoparticles*, „Journal of Materials Chemistry B” 2019, nr 7, s. 6412–6419, DOI: 10.1039/c9tb00992b.

¹²⁸ K. Pietrzak, A. Otlewska, D. Danielewicz, K. Dybka-Stępień, D. Pangallo, L. Krakova, A. Puškárová, M. Bučková, V. Scholtz, M. Đurovič, B. Surma-Ślusarska, K. Demnerova, B. Gutarowska, *Disinfection...*, dz. cyt.

¹²⁹ K. Pietrzak, B. Gutarowska, W. Machnowski, U. Mikołajczyk, *Antimicrobial Properties of Silver Nanoparticles Misting on Cotton Fabrics*, „Textile Research Journal” 2016, nr 86, s. 812–822, <https://doi.org/10.1177/0040517515596933>.

¹³⁰ K. Pietrzak, M. Puchalski, A. Otlewska, H. Wrzosek, P. Guiamet, M. Piotrowska, B. Gutarowska, *Microbial Diversity of Pre-Columbian Archaeological Textiles and the Effect of Silver Nanoparticles Misting Disinfection*, „Journal of Cultural Heritage” 2017, nr 23, s. 138–147, DOI: 10.1016/j.culher.2016.07.007.

¹³¹ K. Pietrzak, S. Glišńska, M. Gapińska, T. Ruman, A. Nowak, A. Egemen, B. Gutarowska, *Silver Nanoparticles: A Mechanism of Action on Moulds*, „Metalomics: Integrated Biometal Science” 2016, nr 8, s. 1294–1302, DOI: 10.1039/c6mt00161k.

¹³² L. Zapór, *Nanometryczne struktury metali i tlenków metali w środowisku pracy – potencjalne zagrożenia. Zasady bezpiecznej pracy*, Zakład Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych CIOP-PIB, Warszawa 2013.

Dezynfekcja pomieszczeń rutynowo stosowana jest w szpitalach czy pomieszczeniach wytwarzania produktów leczniczych. Do dezynfekcji całych pomieszczeń stosuje się lampy UV (generują wolne rodniki, powodują przyspieszone starzenie papieru, odbarwienia), ozonowanie (również generuje wolne rodniki, powoduje przyspieszone utlenianie, odbarwienia), zamgławianie suchą parą (nie badane pod kątem zachowania materii zabytkowej): waporyzowanym nadtlenkiem wodoru lub nadtlenkiem wodoru z nanocząsteczkami srebra (Nospray®, Nocomax®), a także z wykorzystaniem metody łączącej zamgławianie H_2O_2 z ozonowaniem – tzw. perokson (urządzenie AIRDECON 200®). Skuteczność metod zamgławiania potwierdza się obecnie zgodnie z europejską normą: EN 17272:2020 *Chemical disinfectants and antiseptics – Methods of airborne room disinfection by automated process – Determination of bactericidal, mycobactericidal, sporicidal, fungicidal, yeasticidal, virucidal and phagocidal activities*. Promieniowanie UV i ozonowanie w ograniczonym stopniu uszkadza zarodniki grzybów pleśniowych. Ozonowanie w reakcji z tworzywami sztucznymi (np. styren) powoduje tworzenie szkodliwego dla zdrowia i obiektów formaldehydu¹³³.

Wszystkie wymienione metody to metody niszczące, niezalecane do stosowania w pomieszczeniach zabytkowych czy pomieszczeniach, w których przechowywane są zbiory. Można je stosować jedynie dla pomieszczeń współczesnych, bez zbiorów, czyli np. po ewakuacji zbiorów z zalanego i zainfekowanego pomieszczenia. Na podstawie doświadczenia naszej grupy badawczej sugerujemy kontrolę skuteczności dezynfekcji pomieszczeń z wykorzystaniem wymienionych metod. Przy intensywnym wzroście pleśni na powierzchni przegród budowlanych konieczne jest przeprowadzenie oprysków z wykorzystaniem silnych środków grzybobójczych na bazie czwartorzędowych soli amoniowych lub chloru, obniżenie wilgotności względnej powietrza i aktywności wody w materiale, zapewnienie odpowiedniej cyrkulacji powietrza. Ozonowanie i metody dezynfekcji suchą parą można stosować do dezaktywacji toksyn i metabolitów wytwarzanych przez pleśnie w trakcie wzrostu, a także eliminacji przykrego zapachu (we wspomnianych pomieszczeniach bez zbiorów). Samo ozonowanie lub fumigacja suchą parą na ogół nie jest wystarczająca, jeżeli chcemy inaktywować pleśnie i ich formy przetrwalne.

Oprócz opisanych metod istnieje wiele związków chemicznych, które stosuje się **do dezynfekcji pojedynczych obiektów**. Do dezynfekcji obiektów papierowych można stosować pary 4-chloro-3-metylofenolu (PCMC, metoda przekładkowa), kąpiele w wodnych roztworach preparatów biobójczych zawierających czwartorzędowe sole amoniowe (bromek dimetylo-lauryloamoniowy lub propionian didecylo-metylo-poli(oksyetylo)amoniowy) w stężeniu 0,5% oraz kąpiele w 45% wodnym roztworze etanolu¹³⁴. Czwartorzędowe sole amoniowe (np. Altax®) stosowane są do usuwania zagrzybienia przegród budowlanych, eliminacji grzybów pleśniowych z powierzchni kamiennych. Alkoholi nie należy stosować do dezynfekcji powierzchni

¹³³ J. Zhang, W.E. Wilson, P.J. Lioy, *Indoor Air Chemistry: Formation of Organic Acids and Aldehydes*, „Environmental Science & Technology” 1994, nr 28, s. 1975–1982, DOI: 10.1021/es00060a031.

¹³⁴ J. Karbowska-Berent, dz. cyt.

zawierających naturalne barwniki, w szczególności barwionych tkanin, ponieważ alkohol powoduje ekstrakcję substancji roślinnych. Do dezynfekcji obiektów zabytkowych wykorzystywany jest również środek Lichenicida® zawierający aceton i dichlofluanid. Podział metod dezynfekcji w zależności od rodzaju dezynfekowanego materiału (na podstawie danych literaturowych) można znaleźć m.in. w publikacji Beaty Gutarowskiej¹³⁵. Obszerna lista stosowanych fungicydów znajduje się również w opracowaniach Kanadyjskiego Instytutu Konserwacji¹³⁶.

¹³⁵ B. Gutarowska, *Moulds in Biodeterioration of Technical Materials*, „Folia Biologica et Oecologica”, nr 10, s. 27–39.

¹³⁶ T.J.K. Strang, J.E. Dawson, *Controlling Museum Fungal Problem*, „Technical Bulletin” 1991, nr 12, s. 1–8.



Zagrożenia dla zdrowia pracowników instytucji kultury ze strony mikroorganizmów

Jak zauważa Klaus Sedlbauer¹³⁷, zagrożenia dla zdrowia ze strony grzybów pleśniowych zasiedlających pomieszczenia oraz metoda zwalczania pleśni, zostały opisane już w Starym Testamencie¹³⁸. Zalecenia dotyczyły opuszczenia budynku, w którym stwierdzono przebarwienia na ścianach i wyniesienia zakażonych elementów poza osadę. Od tamtego czasu standardy życia ludzi znacznie się poprawiły. Zmianie uległ również tryb życia – obecnie spędzamy w pomieszczeniach około 80–90% czasu (praca, odpoczynek, rekreacja). Dlatego jakość powietrza w pomieszczeniach ma kluczowe znaczenie dla zdrowia ludzi. Zagrożenie stanowią tu zarówno zanieczyszczenia nieorganiczne, jak i pochodzenia biologicznego – bioaerozole (zob. rozdział „Zanieczyszczenie powietrza”). Bioaerozole w pomieszczeniach mogą powodować nie tylko zakażenia wywołane przez określony drobnoustrój (wirusy, bakterie), lecz także zaostrzenie współistniejących chorób układu oddechowego (np. astma), jak również schorzenia alergiczne (nawet >30% pracowników muzeum) i zatrucia (mykotoksyny).

Szczególnym przypadkiem jest Syndrom Chorego Budynku (ang. *Sick Building Syndrome* – SBS). Najczęściej występującym objawem SBS jest ogólne uczucie zmęczenia, które pojawia się po przyjsciu do pomieszczenia lub budynku (najczęściej miejsca pracy), a poprawia się w ciągu kilku minut po opuszczeniu miejsca wywołującego symptomy (stąd podejrzenie o podłoże psychosomatyczne SBS). Typowe objawy SBS to niemigrenowy ból głowy, objawy ze strony skóry, śluzówek (uczucie zatkanego nosa, katar, suchość gardła, suchość oczu)¹³⁹. Badania etiologii SBS wskazują, że jedną z przyczyn wspomnianych objawów jest obecność biotoksyn, które wydzielane są przez mikroorganizmy w trakcie wzrostu np. na ścianach w zawilgotnionych budynkach¹⁴⁰.

¹³⁷ K. Sedlbauer, *Prediction of Mould Fungus...*, dz. cyt.

¹³⁸ *Biblia, Stary Testament, Księga Kapłańska, Rozdział 14, Wersy 33–48.*

¹³⁹ P. Burge, *Sick Building Syndrome*, „Occupational & Environmental Medicine” 2004, nr 61, s. 185–190, DOI: 10.1136/oem.2003.008813.

¹⁴⁰ R.C. Shoemaker, D.E. House, *Sick Building Syndrome (SBS) and Exposure to Water-Damaged Buildings: Time Series Study, Clinical Trial and Mechanisms*, „Neurotoxicology and Teratology” 2006, nr 28, 573–578, DOI: 10.1016/j.ntt.2006.07.003.

Długotrwałe narażenie na wdychanie wysokiej liczby zarodników pleśni, fragmentów strzępek, jak i substancji wydzielanych przez mikroorganizmy w trakcie wzrostu, prowadzi najczęściej do zmian w funkcjonowaniu układu odpornościowego i stanowi tym samym przyczynę alergii. Grupą szczególnego ryzyka są konserwatorzy dzieł sztuki, pracownicy muzeów, bibliotekarze i archiwiści, którzy narażeni są na oddziaływanie zarówno szkodliwych związków chemicznych, biologicznych, jak i mikroorganizmów. W Polsce zrealizowano duży projekt sfinansowany przez Ministerstwo Zdrowia: „Profilaktyka skutków zdrowotnych zawodowego narażenia na czynniki alergizujące i toksyczne u pracowników muzealnictwa i konserwatorów dzieł sztuki”, którego podsumowaniem jest obszerna monografia Instytutu Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera „Zagrożenia i skutki zdrowotne związane z ekspozycją zawodową konserwatorów sztuki i pracowników muzeów”¹⁴¹. Publikacja szczegółowo opisuje czynniki narażenia, skutki zdrowotne, wytyczne postępowania zarówno dla pracowników, jak i lekarzy medycyny pracy (wskazówki dotyczące rozpoznania, badań profilaktycznych, zasadach orzekania o chorobach zawodowych).

Skutki zdrowotne narażenia na czynniki pochodzenia biologicznego, to **infekcje** skórne, dróg oddechowych (np. aspergiloza płuc) rzadziej innych narządów, czy infekcje uogólnione. Grzyby niedoskonałe, w tym drożdżaki, wywołują infekcje najczęściej u osób z obniżoną wydolnością układu immunologicznego (chorzy na AIDS, osoby poddane immunosupresji, po antybiotykoterapii). Do mykologicznych czynników etiologicznych takich schorzeń możemy zaliczyć: (1) *Cryptococcus neoformans* (grzyb drożdżoidalny), wywołujący kryptokozę – zapalenie płuc lub zapalenie ośrodkowego układu nerwowego nawet u ludzi zdrowych. (2) *Blastomyces dermatitidis* – przyczyna blastomykozy północnoamerykańskiej – przewlekła choroba ropna i ziarniniakowa układu oddechowego i skóry. Zdarzają się również infekcje kości, stawów oraz narządów wewnętrznych. Do zakażenia dochodzi przez inhalację zarodników, które mają niewielkie rozmiary, lub w kontakcie ze skażoną glebą czy drewnem. Grzyby charakteryzują się dwojakim sposobem wzrostu – w środowisku naturalnym występują w formie nitkowatej pleśni, a wzrost w formie drożdżowanej stwierdzany jest w zakażonych organizmach. (3) *Aspergillus fumigatus* – przyczyna aspergilozy płuc.

Wiele gatunków pleśni (głównie *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria*, *Cladosporium*, *Mucor*, *Fusarium*, *Stachybotrys*) wytwarza także toksyczne produkty przemiany materii, zwane **mykotoksynami**. Najważniejsze toksyny grzybów pleśniowych to aflatoksyny (wytwarzane przez *Aspergillus*), toksyny *Fusarium*, ochratoksyna A (wytwarzana przez *Aspergillus* i *Penicillium*), patulina (wytwarzana przez *Penicillium expansum*), zearalenon, trichoteceny, alternariol oraz fumonizyny¹⁴². Niektóre z tych związków, jak aflatoksyny, to silne kancerogeny, które mogą stanowić

¹⁴¹ C. Pałczyński, C. Walusiak (red.), *Zagrożenia i skutki zdrowotne związane z ekspozycją zawodową konserwatorów sztuki i pracowników muzeów*, Instytut Medycyny Pracy im. prof. J. Nofera, Łódź 2006.

¹⁴² J. Perkowski, J. Chełkowski, P. Goliński, *Occurrence of Mycotoxins in Cereals, Plants, Foods and Feeds in Poland* [w:] A. Logrieco, A. Visconti (red.), *An Overview on Toxigenic Fungi and Mycotoxins in Europe*, Springer Nature, Switzerland 2004, doi.org/10.1007/978-1-4020-2646-1.

przyczynę raka płuc, powodują także uszkodzenia wątroby. Ochrotoksyna natomiast uszkadza przede wszystkim nerki. Aflatoksyny zostały zaliczone w 1993 r. przez WHO-IARC do pierwszej grupy czynników rakotwórczych¹⁴³. Stachybotriotoksyna wytwarzana przez *Stachybotrys atra* jest silną toksyną mogącą wywoływać zatrucia płucne, zaniki pamięci, krwotoki płucne¹⁴⁴.

I ostatni aspekt oddziaływania grzybów pleśniowych na zdrowie człowieka – **alergie** skórne oraz oddechowe. Alergie skórne obejmują kontaktowe zapalenie skóry, kontaktowe zapalenie skóry z podrażnieniami, pokrzywkę i białkowe zapalenie skóry, obrzęk naczynioruchowy, odczyny fototoksyczne i fotoalergiczne. Do alergii oddechowych o podłożu mykologicznym można zaliczyć alergiczny nieżyt błony śluzowej nosa, astmę oskrzelową, zespół Corrao, alergiczne eozynofilne zapalenie oskrzeli bez astmy. Na uwagę zasługuje liczba opisanych rzadkich form egzogenego alergicznego zapalenia pęcherzyków płucnych i równie ciekawe nazwy zwyczajowe tych schorzeń. Przytoczę tu chociażby „płuco koptyjskie” (dotyczy badaczy i konserwatorów mumii, tzw. Kłątwa Faraona), „płuco klimatyzacyjne” (in. „zespół nawilżacza” – w efekcie narażenia na system klimatyzacji zasiedlony przez mikroorganizmy np. *Thermoactinomyces*, *Klebsiella*), płuco stolarzy, płuco cieśli, sekwojoza (schorzenia powstałe w wyniku narażenia na pył drewna zainfekowanego grzybami pleśniowymi, mykotoksynami)¹⁴⁵. Grzyby należące do rodzajów: *Alternaria*, *Aspergillus*, *Candida*, *Cladosporium* i *Penicillium* to najczęściej opisywane grzyby alergenne. Do alergenów należą zarówno składniki grzybni oraz cytoplazmy komórek grzybów, jak i substancje wydzielane przez grzybnię w trakcie wzrostu¹⁴⁶.

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki (Dz.U. 2005 nr 81, poz. 716, z późn. zm.) szkodliwe czynniki biologiczne, które mogą stanowić przyczynę zakażenia, alergii lub zatrucia to: drobnoustroje komórkowe, pasożyty wewnętrzne oraz jednostki bezkomórkowe zdolne do replikacji lub przenoszenia materiału genetycznego¹⁴⁷. W rozporządzeniu przyjęto 4-stopniową skalę klasyfikacji szkodliwych czynników biologicznych, a Dyrektywa 2000/54/EC zawiera informacje dotyczące sposobu ochrony pracowników¹⁴⁸. Zestawienie informacji z obu aktów prawnych:

¹⁴³ C. Pałczyński, C. Walusiak (red.), *Zagrożenia...*, dz. cyt.

¹⁴⁴ B. Gutarowska, *Grzyby...*, dz. cyt.

¹⁴⁵ C. Pałczyński, C. Walusiak (red.), *Zagrożenia...*, dz. cyt.

¹⁴⁶ C. Pałczyński, T. Wittczak, W. Dudek, M. Wiszniewska, D. Świerczyńska-Machura, P. Krawczyk-Szulc, B. Kręcisz, M. Kieć-Świerczyńska, J. Walusiak-Skorupa, *Czynniki alergizujące w środowisku pracy konserwatorów dzieł sztuki i pracowników muzeów*, „Alergia” 2013, nr 1, s. 41–45.

¹⁴⁷ Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki (Dz.U. 2005 nr 81, poz. 716, z późn. zm.).

¹⁴⁸ Dyrektywa 2000/54/EC Parlamentu Europejskiego oraz Rady Europejskiej z dnia 18 września 2000 r. dotycząca ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na czynniki biologiczne w pracy.

- **Grupa 1** – czynniki, przez które wywołanie chorób u ludzi jest mało prawdopodobne. Przy narażeniu na czynniki biologiczne z Grupy 1 ryzyka nie jest konieczne stosowanie środków ochrony indywidualnej, a sugeruje się tam stosowanie jedynie odzieży roboczej.
- **Grupa 2** – czynniki, które mogą wywoływać choroby u ludzi, mogą być niebezpieczne dla pracowników, ale rozprzestrzenienie ich w populacji ludzkiej jest mało prawdopodobne. Zazwyczaj istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia. Konieczne jest stosowanie odpowiedniej odzieży roboczej.
- **Grupa 3** – czynniki, które mogą wywoływać u ludzi ciężkie choroby, są niebezpieczne dla pracowników, a rozprzestrzenienie ich w populacji ludzkiej jest bardzo prawdopodobne. Zazwyczaj istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia. Konieczne jest stosowanie odpowiedniej odzieży ochronnej.
- **Grupa 4** – czynniki, które wywołują u ludzi ciężkie choroby, są niebezpieczne dla pracowników, a rozprzestrzenienie czynników w populacji ludzkiej jest bardzo prawdopodobne. Zazwyczaj nie istnieją w stosunku do nich skuteczne metody profilaktyki lub leczenia. W warunkach narażenia pracowników na działanie czynników biologicznych, zaklasyfikowanych do Grupy 4 ryzyka, należy stosować kombinezony gazoszczelne oraz izolujący sprzęt ochrony układu oddechowego o największym wskaźniku ochrony.

Ponadto w grupach 2 i 3 zaleca się stosowanie odpowiednio sprzętu ochrony układu oddechowego, sprzętu ochrony oczu i twarzy oraz obuwia ochronnego i rękawic ochronnych. Sprzęt ten powinien się charakteryzować taką samą konstrukcją, jak stosowany do ochrony przed czynnikami chemicznymi, oraz powinien spełniać wymagania chronienia przed czynnikami biologicznymi w postaci kropeł lub rozbryzgów cieczy, pyłów oraz gazów. Gogle oraz osłony twarzy powinny spełniać wymagania, dotyczące odporności na działanie środków dezynfekcyjnych, a ich konstrukcja powinna być pozbawiona elementów umożliwiających gromadzenie się aerozoli biologicznych.

W tabeli 8 wymienione są **gatunki** grzybów pleśniowych i drożdżaków, które zgodnie z przytoczonym Rozporządzeniem Ministra Zdrowia uznawane są za szkodliwe czynniki biologiczne należące do 2 i 3 grupy zagrożenia. Nadmienię jeszcze (aby podkreślić stopień narażenia), że do 2 grupy zaliczane są m.in. bakterie: *Clostridium botulinum*, *Vibriocholeae*, *Salmonella typhimurium*, *Helicobacterpylori*; wirusy: różyczki, odry, ospy wietrznej. W 3 grupie szkodliwych czynników biologicznych znajdują się np. *Bacillus anthracis* (laseczka wąglika), *Mycobacterium leprae* (prątek trądu), *Mycobacterium tuberculosis* (prątek gruźlicy), *Yersinia pestis* (pałeczka dżumy), wirus HIV, zapalenia wątroby typu C, SARS.

Jeżeli istnieje podejrzenie narażenia w miejscu pracy na wymienione w tabeli 8 szkodliwe czynniki biologiczne, należy przeprowadzić identyfikację wyizolowanych mikroorganizmów do gatunku. W przypadku grzybów pleśniowych nie jest to prosta metodyka. Ocena makro- i mikroskopowa jest często niewystarczająca do identyfikacji na poziomie gatunku. Taką identyfikację

może jednak przeprowadzić mykolog z wieloletnim doświadczeniem. Alternatywą jest identyfikacja grzybów pleśniowych metodami genetycznymi. W przypadku niektórych rodzajów np. *Penicillium*, konieczne jest ustalenie sekwencji kilku genów markerowych, aby ustalić przynależność gatunkową, co z kolei generuje wysokie koszty takiej analizy. Identyfikacja szkodliwych czynników biologicznych w miejscu pracy może stanowić podstawę w orzecznictwie chorób zawodowych.

Tabela 8. Klasyfikacja szkodliwych czynników biologicznych (grzybów pleśniowych)

Szkodliwy czynnik biologiczny – GRZYBY	Klasyfikacja według grup zagrożenia
<i>Aspergillus fumigatus</i>	2
<i>Candida albicans</i>	
<i>Candida tropicalis</i>	
<i>Cryptococcus neoformans</i> var. <i>neofonnans</i> (<i>Filobasidiella neofonnans</i> var. <i>neofonnans</i>)	
<i>Cryptococcus neoformans</i> var. <i>gattii</i> (<i>Filobasidiella bacillispora</i>)	
<i>Emmonsia parva</i> var. <i>parva</i>	
<i>Emmonsia parva</i> var. <i>crescens</i>	
<i>Epidermophyton floccosum</i>	
<i>Fonsecaea compacta</i>	
<i>Fonsecaea pedrosoi</i>	
<i>Madurella grisea</i>	
<i>Madurella mycetomatis</i>	
<i>Microsporium</i> spp.	
<i>Neotestudina rosatii</i>	
<i>Penicillium marneffeii</i>	
<i>Scedosporium apiospermum</i> (<i>Pseudallescheria boydii</i>)	
<i>Scedosporium prolificans</i> (<i>inflatum</i>)	
<i>Sporothrix schenckii</i>	
<i>Trichophyton rubrum</i>	
<i>Trichophyton</i> spp.	
<i>Blastomyces dermatitidis</i> (<i>Ajellomyces dermatitidis</i>)	3
<i>Cladophialophora bantiana</i> (uprzednio: <i>Xylohypha bantiana</i> , <i>Cladosporium bantianum</i> lub <i>trichoides</i>)	
<i>Coccidioides immitis</i>	
<i>Histoplasma capsulatum</i> var. <i>capsulatum</i> (<i>Ajellomyces capsulatus</i>)	
<i>Histoplasma capsulatum duboisii</i>	
<i>Paracoccidioides brasiliensis</i>	

Źródło: Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r. w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. 2005 nr 81, poz. 716 z późn. zm.).

Oprócz wymienionych szkodliwych czynników biologicznych (zaznaczam, że uwzględniłam jedynie grzyby), konserwatorzy zabytków i dzieł sztuki narażeni są na oddziaływanie metali (ołów, chrom, arsen, rtęć, antymon, kadm, kobalt, mangan), rozpuszczalników (benzen i jego homologi, toluen, ksylen, benzyna, cykloheksan), chloramin, żywic i tworzyw sztucznych (akrylany, polimery winylowe, poliamidy, żywice syntetyczne, poliuretany, polistyreny), promieniowanie (m.in. elektromagnetyczne, podczerwone, laserowe) oraz obciążenia układu ruchu związane z wymuszoną postawą ciała w trakcie wykonywanej pracy¹⁴⁹. Stąd wspomniane związki chemiczne (oprócz opisanych alergenów pleśni), bakterie, promieniowce, porosty, glony oraz owady, roztocza, gryzonie (i ich odchody) oraz inne, nie wymienione lub niepoznane czynniki, stanowią często przyczynę alergii¹⁵⁰.

¹⁴⁹ C. Pałczyński, C. Walusiak (red.), *Zagrożenia...*, dz. cyt.

¹⁵⁰ C. Pałczyński, T. Wittczak, W. Dudek, M. Wiszniewska, D. Świerczyńska-Machura, P. Krawczyk-Szulc, B. Kręcisz, M. Kieć-Świerczyńska, J. Walusiak-Skorupa, *Czynniki alergizujące w środowisku pracy konserwatorów dzieł sztuki i pracowników muzeów*, „Alergia” 2013, nr 1, s. 41–45.

Zabezpieczenia przed szkodliwym oddziaływaniem mikroorganizmów na zdrowie człowieka

W ramach profilaktyki wskazane jest stosowanie odzieży ochronnej, we wszystkich zabiegach konserwatorskich, przy których istnieje narażenie na szkodliwe czynniki biologiczne i pyły (zawierają cząsteczki biologiczne). Do takich prac zalicza się czyszczenie, odkurzanie, konserwację, renowację, przepakowywanie zbiorów, przemieszczanie obiektów, przeglądy konserwatorskie (Ryc. 32A, B, 33A, B). Osoby pracujące z obiektami zabytkowymi powinny stosować maseczki jednorazowe, najlepiej przeciwpyłowe klasy P2 lub P3. Z obiektami należy pracować w fartuchach lub kombinezonach (najlepiej przeciwpyłowych) i jednorazowych rękawiczkach. Pomiarów czynników szkodliwych także wykonuje się w odzieży ochronnej (Ryc. 33A, B). Wskazane są również częste mycie i dezynfekcja rąk.

Ryc. 32. (A) Odzież ochronna: praca z materiałem archeologicznym i pobór próbek powietrza do analiz mikrobiologicznych. Fot. M. Dyda

Ryc. 32. (B) Odzież ochronna: w trakcie pomiarów mikrobiologicznych w magazynie – półmaska przeciwpyłowa klasy P3, gogle, rękawice jednorazowe i kombinezon przeciwpyłowy klasy P2. Fot. M. Dyda



Zarówno odkurzanie, jak i manualne oczyszczanie z wykorzystaniem pędzli, ściereczek z mikrofibry itp. najlepiej wykonywać w wydzielonym pomieszczeniu, z wyodrębnionym systemem wentylacji lub, jeśli gabaryty obiektu na to pozwalają, w komorach z filtrem HEPA, jak np. mobilne stanowisko do prac konserwatorskich Spirabilia®. Praca w odzieży ochronnej (kombinezon przeciwpylowy, maska całotwarzowa) powinna odbywać się w cyklach: 1 h pracy, 30 min przerwy (z możliwością przebrania się w wydzielonym pomieszczeniu i z dostępem do pomieszczenia socjalnego).

Ryc. 33. Mechaniczne oczyszczanie obiektów ze zbiorów historii naturalnej Wydziału Biologii UW przez konserwatora zabytków. (A) Oczyszczanie czaszki hipopotama oraz (B) wypchanego pingwina. Konserwator w odzieży ochronnej. Fot. P. Popławski



Artykuł 222 § 1 Kodeksu pracy¹⁵¹ zawiera zapis: „W razie zatrudniania pracownika w warunkach narażenia na działanie szkodliwych czynników biologicznych pracodawca stosuje wszelkie dostępne środki eliminujące narażenie, a jeżeli jest to niemożliwe – ograniczające stopień tego narażenia, przy odpowiednim wykorzystaniu osiągnięć nauki i techniki”. Ponadto, zgodnie z art. 226: „Pracodawca: (1) ocenia i dokumentuje ryzyko zawodowe związane z wykonywaną pracą oraz stosuje niezbędne środki profilaktyczne zmniejszające ryzyko; (2) informuje pracowników o ryzyku zawodowym, które wiąże się z wykonywaną pracą, oraz o zasadach ochrony przed zagrożeniami”. W art. 227 § 1 zaś: „Pracodawca jest obowiązany stosować środki zapobiegające chorobom zawodowym i innym chorobom związanym z wykonywaną pracą, w szczególności:

- 1) utrzymywać w stanie stałej sprawności urządzenia ograniczające lub eliminujące szkodliwe dla zdrowia czynniki środowiska pracy oraz urządzenia służące do pomiarów tych czynników;
- 2) przeprowadzać, na swój koszt, badania i pomiary czynników szkodliwych dla zdrowia, rejestrować i przechowywać wyniki tych badań i pomiarów oraz udostępniać je pracownikom”.

¹⁵¹ Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. Kodeks pracy (Dz.U. 1974 nr 24, poz. 141).

Przed wyborem środka zapobiegawczego pracodawca powinien dokonać oceny ryzyka zawodowego¹⁵². **Ocena ryzyka zawodowego** powinna być przeprowadzona na podstawie wszelkich dostępnych i aktualnych informacji o czynnikach biologicznych. Powinna również uwzględnić¹⁵³:

- klasyfikację i wykaz szkodliwych czynników biologicznych;
- rodzaj, stopień zagrożenia ze strony danego czynnika (grupa 2, 3 lub 4) oraz czas trwania narażenia na działanie szkodliwych czynników biologicznych;
- informacje o potencjalnym działaniu alergizującym lub toksycznym szkodliwych czynników biologicznych;
- informacje o chorobach, które mogą wystąpić w następstwie wykonywanej pracy ze wspomnianymi czynnikami, w ocenie należy uwzględnić także możliwe działanie alergizujące i toksyczne;
- informacje o stwierdzonej chorobie, która miała bezpośredni związek z wykonywaną pracą związaną z czynnikami biologicznymi;
- wskazówki inspekcji sanitarnej, inspekcji pracy oraz jednostek służby medycyny pracy.

Ocena ryzyka dotyczy czynności, podczas których pracownicy w wyniku wykonywania pracy są, lub mogą być potencjalnie narażeni na działanie czynników biologicznych. W przypadku jakiegokolwiek czynności, która może stwarzać ryzyko wystąpienia narażenia na działanie czynników biologicznych, oprócz określenia zagrożenia infekcyjnego podczas dokonywania oceny ryzyka, dodatkowo muszą być wzięte pod uwagę **działania toksyczne i alergizujące czynników biologicznych**. Działania toksyczne i alergizujące nie mają wpływu na przyporządkowanie czynności do stopnia hermetyczności, ale mogą wymagać w konkretnym przypadku określonych działań ochronnych.

Okresowo wykonywanie badań czynników narażenia w miejscu pracy w danej instytucji powinien zlecić dział BHP. Analizy powinny uwzględniać badanie narażenia na szkodliwe czynniki biologiczne (analizy mikrobiologiczne powietrza i powierzchni użytkowych), narażenie na pyły zawieszone w powietrzu czy związki chemiczne, na które narażeni są konserwatorzy dzieł sztuki i opiekunowie zbiorów. Obszerną listę szkodliwych związków chemicznych można znaleźć w publikacjach Centralnego Instytutu Ochrony Pracy (CIOP)^{154, 155}.

¹⁵² M. Gołofit-Szymczak, R.L. Górny, *Szkodliwe czynniki biologiczne – ocena ryzyka zawodowego*, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2018.

¹⁵³ Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r., dz. cyt.

¹⁵⁴ A. Jeżewska, M. Szewczyńska, A. Woźnica, *Zagrożenia chemiczne w pracowni konserwacji malarstwa. Materiały szkoleniowe*, Zakład Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych CIOP-PIB, Warszawa 2013, https://www.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/78961/chempyl_zagrozenia_konserw_malarstwa.pdf.

¹⁵⁵ A. Jeżewska, M. Szewczyńska, *Zagrożenia chemiczne w środowisku pracy konserwatora malarstwa*, „Medycyna Pracy” 2012, nr 63, s. 547–558.

Zgodnie z Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy¹⁵⁶:

1. Badania i pomiary czynników szkodliwych dla zdrowia w *środowisku* pracy wykonują laboratoria, które uzyskały akredytację w tym zakresie na podstawie przepisów Ustawy z dnia 30 sierpnia 2002 r. o systemie oceny zgodności (Dz.U. 2010 nr 138, poz. 935).
2. W przypadku braku wymienionych w ust. 1 laboratoriów akredytowanych do badania lub pomiarów określonego czynnika, badania i pomiary wykonują:
 - 1) laboratoria szkół wyższych, instytutów naukowych Polskiej Akademii Nauk lub instytutów badawczych, które prowadzą badania i pomiary czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy i mają wdrożony system zapewnienia jakości lub
 - 2) laboratoria Państwowej Inspekcji Sanitarnej, Wojskowej Inspekcji Sanitarnej i Państwowej Inspekcji Sanitarnej Ministerstwa Spraw Wewnętrznych i Administracji – jeżeli mają wdrożony system zapewnienia jakości lub
 - 3) laboratoria prowadzone przez jednostki organizacyjne lub osoby fizyczne, które uzyskały certyfikat kompetencji w zakresie wykonywania badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy na podstawie przepisów ustawy z dnia 30 sierpnia 2002 r. o systemie oceny zgodności, dysponujące aparaturą do badań i pomiarów tych czynników, która podlega udokumentowanemu nadzorowi metrologicznemu obejmującemu okresowe wzorcowania lub sprawdzania i konserwację.

Ponadto, konserwatorzy dzieł sztuki, bibliotekarze, archiwiści i opiekunowie zbiorów powinni w trakcie badań okresowych otrzymać skierowanie na RTG klatki piersiowej. Samo badanie spirometryczne nie jest wystarczające do wykrycia wczesnych etapów rozwoju choroby nowotworowej czy zmian w płucach spowodowanych narażeniem na wdychanie pyłu¹⁵⁷.

Jeżeli w budynku nie ma możliwości zapewnienia odpowiedniej wentylacji czy odzieży ochronnej w ilości wymaganej do bezpiecznego wykonywania prac konserwatorskich, bibliotecznych lub archiwalnych, rozwiązaniem może okazać się skrócenie czasu pracy. Takie zasady obowiązują konserwatorów dzieł sztuki m.in. w Muzeum Zamku Królewskiego na Wawelu, w Muzeum Narodowym w Warszawie czy Muzeum Wojska Polskiego.

¹⁵⁶ Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. 2011 nr 33, poz. 166).

¹⁵⁷ J. Domagała-Kulawik, *Rak płuca* (prezentacja), XV Konferencja Naukowa *Problemy jakości powietrza wewnątrznego w Polsce*, 27–28 listopada 2019 r., Politechnika Warszawska.



Podsumowanie

Zagrożenia mikrobiologicznego zbiorów muzealnych nie należy bagatelizować. Mikroorganizmy przystosowały się do życia w różnych środowiskach, wytworzyły często zadziwiające strategie przeżycia oraz wysoką odporność na ekstremalne wartości czynników fizykochemicznych. Walka z tak wyspecjalizowanym przeciwnikiem nie należy do łatwych. Wystarczy wzrost aktywności wody w podłożu, aby uruchomiły procesy życiowe i w konsekwencji spowodowały utratę walorów estetycznych i wartości całych kolekcji.

Działania prewencyjne, które zaprezentowałam na łamach tego opracowania mogą stanowić wsparcie w walce z niewidocznym wrogiem. Wpisują się one również w zadania priorytetowe instytucji muzealnych określone w art. 1 i 2 Ustawy z dnia 21 listopada 1996 r. o muzeach (Dz.U. 1997 nr 5, poz. 24), do których należy dbałość o zachowanie dziedzictwa narodowego dla przyszłych pokoleń, w możliwie najmniej zmienionym stanie¹⁵⁸.

¹⁵⁸ Ustawa z dnia 21 listopada 1996 r. o muzeach (Dz.U. 1997 nr 5, poz. 24).

O autorce

Magdalena Dyda, absolwentka studiów magisterskich na kierunku Biotechnologia, ze specjalizacją Mikrobiologia w Instytucie Mikrobiologii Wydziału Biologii Uniwersytetu Warszawskiego. Obecnie realizuje pracę doktorską dotyczącą biodeterioracji obiektów zabytkowych w Zakładzie Geomikrobiologii Wydziału Biologii Uniwersytetu Warszawskiego. W pracy naukowej interesuje się ochroną zabytków, zbiorów archiwalnych i bibliotecznych przed szkodliwą aktywnością mikroorganizmów, wpływem czynników fizykochemicznych na stan zachowania materii zabytkowej oraz działaniami prewencyjnymi, w tym monitoringiem warunków przechowywania zbiorów. Uczestniczyła w projektach badawczych realizowanych w największych instytucjach muzealnych i archiwalnych w kraju. Od 2017 r. prowadzi szkolenia i warsztaty mikrobiologiczne w ramach współpracy Narodowego Instytutu Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów z Wydziałem Biologii Uniwersytetu Warszawskiego.



© Narodowy Instytut Muzealnictwa
i Ochrony Zbiorów, Warszawa 2020
ISBN 978-83-64889-44-8

Koordynator projektu: Marek Rogowski
Sekretarz wydawnictw: dr Julia Wrede
Redakcja językowa: Weronika Doboszyńska
Korekta: zespół
Projekt okładki: Piotr Modelewski
Zdjęcie na okładce: Fot. M. Dydą
Opracowanie graficzne i łamanie: Jan Piętka
Druk: Drukarnia DSS Szczepan Szymański

Szkolenia Narodowego Instytutu Muzealnictwa
i Ochrony Zbiorów 13/2020

ISBN 978-83-64889-44-8



NARODOWY
INSTYTUT MUZEALNICTWA
I OCHRONY ZBIORÓW

ul. Goraszewska 7, 02-910 Warszawa
tel. (+48 22) 25 69 600, fax: (+48 22) 25 69 650
e-mail: biuro@nimosz.pl
www.nimosz.pl