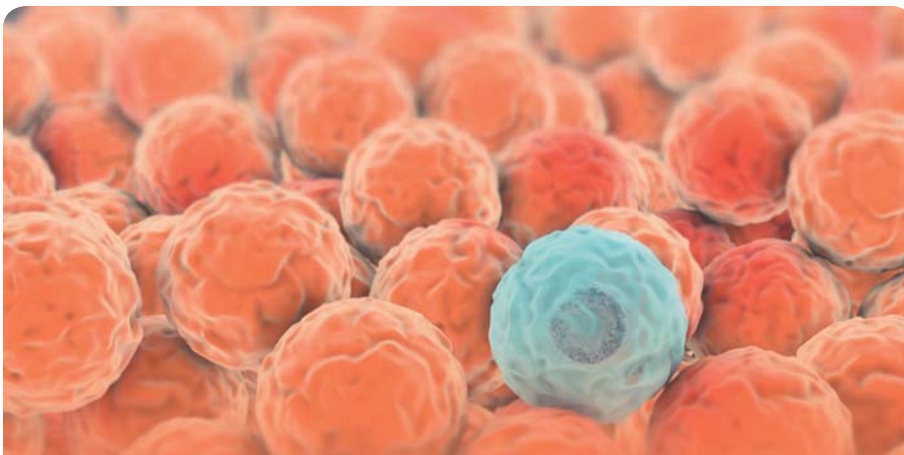


dr hab. n. med. RAFAŁ L. GÓRNY, prof. nadzw. CIOP-PIB
mgr inż. AGATA STOBNIKA
Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy
Kontakt: ragor@ciop.pl

Szkodliwe czynniki biologiczne – ochrona zdrowia pracowników

Fot. timbik/Bigstockphoto



Szkodliwe czynniki biologiczne (SCB) stanowią poważne, choć często bagatelizowane zanieczyszczenie środowiska pracy. Brak rutynowej kontroli jakości higienicznej środowiska pracy uwzględniającej obecność czynników biologicznych i wciąż niska świadomość istnienia tego problemu może stworzyć realne i poważne zagrożenie dla zdrowia pracowników. W artykule podano definicję SCB, omówiono powszechność występowania zagrożeń biologicznych, rolę bioaerozoli jako najpowszechniejszej formy ich transportu w środowisku, scharakteryzowano źródła SCB w środowisku pracy, przedstawiono wymogi prawne oraz metody kontroli, oceny narażenia i ryzyka. Przedstawiono też bieżące i nowe wyzwania, jakie stoją dziś przed nauką i techniką, a które mają lub będą miały wpływ na kontrolę i zapobieganie skutkom niekorzystnego oddziaływania SCB na człowieka w środowisku pracy i poza nim.

Słowa kluczowe: szkodliwe czynniki biologiczne, bioaerozol, metody badawcze, prawne wymogi kontroli, normatywy higieniczne, ocena narażenia i ryzyka

Harmful biological agents – employees' health protection

Harmful biological agents (HBA) are serious, however quite frequently underestimated, contaminants of occupational settings. A lack of routine control of hygienic quality in working environment regarding the presence of biological agents together with a low awareness of contamination problems may create a real and considerable danger for workers' health. In this paper definition of HMA is given, widespread of biohazards in the environment is discussed, role of bioaerosols as the most common way if transport is described, sources of HMA in working environment are characterized and legal measures applied in control, exposure and risk assessments are presented. The problems of current and future scientific and technical challenges related to control and prevention of adverse health outcomes caused by HMA in exposed individuals in both occupational and non-occupational environments are also discussed in this paper.

Keywords: szkodliwe czynniki biologiczne, bioaerozol, metody badawcze, prawne wymogi kontroli, normatywy higieniczne, ocena narażenia i ryzyka

Wstęp

Szkodliwe czynniki biologiczne (SCB) to drobnoustroje (w tym: zmodyfikowane genetycznie), hodowle komórkowe (w tym: prowadzone w warunkach laboratoryjnych hodowle komórek pochodzących z organizmów wielokomórkowych), wewnętrzne pasożyty ludzkie, zdolne do wywołania zakażenia, alergii lub reakcji toksycznej bezpośrednio lub przez wytwarzane przez nie struktury i substancje, a także komórkowe i bezkomórkowe organizmy zdolne do replikacji lub przenoszenia materiału genetycznego. Dzisiejszy stan wiedzy w pełni uprawnia do takiego właśnie definiowania i postrzegania SCB. Na tym tle, definicje zawarte w dyrektywie 2000/54/WE (w sprawie ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na działanie czynników biologicznych w miejscu pracy), [1] oraz wywodzącym się z niej rozporządzeniu Ministra Zdrowia (w sprawie szkodliwych czynników biologicznych dla zdrowia w środowisku pracy oraz ochrony zdrowia pracowników zawodowo narażonych na te czynniki), wraz z jego zmianą, [2] są nieprecyzyjne i znacząco zaniżają liczbę czynników, o których wiadomo, że są odpowiedzialne za wiele chorób, dolegliwości czy niekorzystnych symptomów obserwowanych u pracowników.

Czynniki biologiczne w środowisku pracy

Narażenie na czynniki biologiczne w środowisku pracy jest powszechne. Mogą nimi być zarówno priony, jak i wszystkie organizmy żywe, od wirusów poczynając, a na ssakach i ich alergenach kończąc. Liczba znanych nam czynników biologicznych jest niewielka: mimo ogromnego postępu w naukach biologicznych znamy dzisiaj ok. 156 tys., czyli ok. 9% szacunkowej liczby gatunków wszystkich mikroorganizmów występujących na świecie (tabela 1.), [3].

Klasyfikacja zagrożeń biologicznych w środowisku pracy, zamieszczona w załączniku

Tabela 1. Szacunkowa liczba gatunków mikroorganizmów na świecie [3]

Table 1. Estimated number of microbial species in the world [3]

Grupa mikroorganizmów	Liczba znanych gatunków	Szacunkowa liczba gatunków	Procent znanych gatunków
Wirusy	5000	130000	4
Bakterie	4760	40000	12
Glony	40000	60000	67
Grzyby i porosty	69000	1500000	5
Pierwotniaki	40000	100000	31
Razem	158760	1830000	9

do dyrektywy 2000/54/WE [1] obejmuje jedynie 375 czynników, w większości zakaźnych lub inwazyjnych, podzielonych na 4 grupy: wirusy i priony, bakterie, grzyby i pasożyty. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z 2005 r. [2] uwzględnia (w tych samych grupach) 377 czynników. W polskiej monografii [4], obejmującej szerzej SCB o działaniu alergizującym i toksycznym, sklasyfikowano ogółem 650 czynników lub grup czynników, w tym: 6 prionów, 137 wirusów, 186 bakterii, 75 grzybów, 83 pasożyty, 90 czynników roślinnych i 73 czynniki zwierzęce (inne niż pasożyty). Należy podkreślić, że faktyczna liczba biologicznych czynników zagrożenia zawodowego jest w rzeczywistości znacznie większa. Szkodliwe działanie wielu z nich (zwłaszcza alergenów) nie zostało dotąd powiązane z wykonywaniem określonego zawodu, a zmienność genotypowa czy fenotypowa może prowadzić do pojawienia się nowych SCB stanowiących poważne zagrożenie.

Powszechność zagrożenia szkodliwymi czynnikami biologicznymi w środowisku pracy

Według Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy (EU-OSHA), co roku na świecie w wyniku chorób zakaźnych umiera blisko 320 tys. pracowników, z czego około 5 tys. na terenie UE [5]. Szacuje się, że w 15 krajach tzw. Starej Unii, około 2 tys. przypadków rozpoznanych chorób zawodowych jest powodowanych przez SCB. Dane francuskie wykazują, że 2,6 mln pracowników (czyli ~15% zatrudnionych) jest narażonych na kontakt z SCB w miejscu pracy. Najnowszy raport dotyczący chorób zawodowych w Polsce jednoznacznie pokazuje, że choć ogólna liczba chorób w latach 2010-2012 zmniejszyła się z 2933 do 2402, to w przypadku chorób zakaźnych i pasożytniczych albo ich następstw (w tym najczęściej stwierdzanej pośród nich boreliozy) odsetek wzrósł z 24,9% (19,2%) w 2010 roku do 29,4% (22,1%) w 2012 roku [6, 7]. Liczby te dobitnie wskazują, że z punktu widzenia zdrowia publicznego, niekorzystne efekty wynikające z narażenia na SCB są powszechne, a co za tym idzie, koszty niwelacji ich skutków sięgają znacznych kwot.

Przykładem może być tutaj Wielka Brytania, gdzie co roku u ok. 200 osób rozpoznaje się niekorzystne skutki zdrowotne wywołane przez kontakt z SCB, a społeczne koszty likwidacji skutków tego rodzaju narażenia oceniane są na około 100 mln funtów*. W Stanach Zjednoczonych co roku notuje się około 250 mln infekcji dróg oddechowych, co przekłada się na: -75 mln wizyt u lekarza, -150 mln opuszczonych dni w pracy i koszty medyczne z tym związane ~10 mld dolarów [8].

Bioaerozole

Czynniki biologiczne najczęściej stanowią zagrożenie dla człowieka będąc obecne w środowisku w formie bioaerozoli, tj. zawieszonych w powietrzu cząstek pochodzenia biologicznego. Ich średnice wahają się od ~0,02, do kilkuset μm . Bioaerozole przenoszone drogą powietrzno-pyłową lub powietrzno-kropelkową mogą przenikać do organizmu przez nabłonek nosa, jamy ustnej, spojówek, oskrzeli i pęcherzyków płucnych oraz naskórek, a w środowisku pracy mogą być:

- czynnikami powodującymi choroby zakaźne i inwazyjne (np. wirusy, bakterie, grzyby),
 - alergenami (pochodzenia bakteryjnego, grzybowego, roślinnego lub zwierzęcego),
 - toksynami i związkami biologicznymi o podobnych właściwościach (np. endotoksyny, glukany),
 - substancjami rakotwórczymi (np. mikotoksyny, takie jak aflatoksyna, ochratoksyna, trichoteceny),
 - cząstkami reaktywnymi immunologicznie (np. cząstki submikro- i nanometryczne pochodzenia bakteryjnego lub grzybowego).
- Bioaerozole są obecne zarówno w przestrzeniach zamkniętych (np. wewnątrz budynków), jak i w środowisku zewnętrznym. Głównym ich źródłem w środowisku zewnętrznym są: gleba, naturalne i sztuczne zbiorniki wodne oraz żywe i martwe rośliny.

* Crook B. *Difficulty of assessing biological risks in the workplace*. Materiały seminarium *Occupational biological risks: Facing up to the challenges* organizowanego przez EU-OSHA, Bruksela, 5-6 czerwca 2007 <http://extranet.osha.europa.eu/12103/504488/765530/765646/view?searchterm=Crook;31.01.2014>

We wnętrzach mogą być związane bezpośrednio ze środowiskiem pracy lub od niego niezależnie. W środowisku pracy źródła cząstek biologicznych mogą posiadać wysoki potencjał produktywny i emitować bioaerozole o stężeniach dochodzących do 10^{12} jtk/ m^3 (jednostek tworzących kolonie w 1 m^3 powietrza). Wśród źródeł niezwiązanych bezpośrednio z procesem produkcji, największe znaczenie ma obecność ludzi i ich aktywność fizyczna. Występowanie bioaerozoli jest naturalne, a częstość ich pojawiania się i zasięg zależy od: stref klimatycznych, regionów geograficznych, charakteru biotopu oraz występowania i rozmieszczenia poszczególnych gatunków roślin i zwierząt. Bioaerozole podlegają cyklicznym zmianom dobowym, jak i rocznym, zarówno co do liczby, jak i składu taksonomicznego cząstek [9]. Parametry mikroklimatu, tj. temperatura i wilgotność względna powietrza, wraz z innymi fizycznymi parametrami środowiska (np. promieniowaniem ultrafioletowym), dostępnością różnych form tlenu) warunkują liczbę mikroorganizmów obecnych w powietrzu. Czynniki te mają również decydujący wpływ na możliwości przetrwania drobnoustrojów i na ich zdolność do kolonizacji powierzchni materiałów, na których zostały zdeponowane [10]. Możliwość wywołania infekcji jest cechą cząstek żywych, natomiast właściwości alergizujące lub toksyczne mogą być zachowane także po śmierci cząstki biologicznej. W środowisku żywe cząstki mikroorganizmów ulegają ciągłym zmianom genotypowym (mutacjom), fenotypowym, ewolucji oraz selekcji względnej (utrata cech dotychczasowych lub nabycie nowych cech w kolejnych pokoleniach). Wszystkie te zmiany mogą prowadzić do pojawienia się cząstek obdarzonych „nowymi” właściwościami, np. bakterii opornych na antybiotyki lub środki dezynfekujące, grzybów odpornych na fungicydy, pierwotniaków opornych na leki, itp.

Głębokość penetracji i zachowanie się cząstek bioaerozoli w drogach oddechowych zależy od ich rozmiarów, kształtu, gęstości, ładunku elektrycznego, składu chemicznego i reaktywności. Ponadto czynniki fizjologiczne, takie jak sposób oddychania i związana z nim prędkość przepływu powietrza w drogach oddechowych, również wpływają na oba te procesy. Dla potrzeb badań medycznych czy środowiskowych, w których konieczne jest określenie wielkości narażenia, cząstki bioaerozolu charakteryzuje się wykorzystując ich średnicę aerodynamiczną [11]. Rodzaj interakcji pomiędzy cząstkami bioaerozoli i komórkami organizmu człowieka zależy od miejsca ich osadzenia się i czasu przebywania w drogach oddechowych [12]. Oznacza to, że:

- wdychane cząstki o średnicy aerodynamicznej równej lub większej niż $10 \mu\text{m}$ (np. pyłki roślin, zarodniki grzybów) są zatrzymywane

w obrębie nosa i gardła powodując podrażnienia oczu lub błony śluzowej,

b) cząstki, których rozmiary wahają się w granicach 5-10 µm (np. zarodniki grzybów, agregaty cząstek bioaerozoli) docierając do rejonów gardła i tchawicy mogą wywoływać objawy astmatyczne,

c) cząstki o rozmiarach poniżej 0,5 µm (np. pojedyncze zarodniki grzybów, komórki bakterii, ich fragmenty i agregaty z cząstkami pyłu) penetrując rejony od oskrzeli do pęcherzyków płucnych mogą wywołać reakcję w postaci alergicznego zapalenia pęcherzyków płucnych.

Narażenie na szkodliwe czynniki biologiczne i ocena ryzyka

Na działanie SCB pracownicy mogą być narażeni w wielu środowiskach pracy. Stopień zagrożenia zależy od siły źródła zanieczyszczenia biologicznego i charakteru wykonywanej pracy. Ten ostatni aspekt jest wypadkową zarówno zdolności danego źródła do generowania cząstek biologicznych do środowiska, jak również tego, czy i jakie środki zabezpieczające zastosowano w celu ochrony pracowników przed ich działaniem. Nawet, jeśli dana aktywność zawodowa nie prowadzi do kontaktu z czynnikami biologicznymi, szczególne okoliczności jej towarzyszące mogą wywołać ich niezamierzoną emisję lub namnożenie, co może prowadzić do wzrostu narażenia powyżej pewnego poziomu uznanego za „normalny” dla danego środowiska. W związku z tym każda, nawet przypadkowa emisja czynników biologicznych musi być brana pod uwagę przy ocenie narażenia na SCB.

Zgodnie z artykułami 207 i 207¹ kodeksu pracy [13], pracodawca jest obowiązany chronić zdrowie i życie pracowników przez zapewnienie bezpiecznych i higienicznych warunków pracy przy odpowiednim wykorzystaniu osiągnięć nauki i techniki oraz przekazywać pracownikom informacje o zagrożeniach dla zdrowia i życia występujących w przedsiębiorstwie, na poszczególnych stanowiskach pracy i przy wykonywanych pracach, w tym o zasadach postępowania w przypadku awarii i innych sytuacji zagrażających zdrowiu i życiu pracowników. Z kolei art. 226 kp nakłada na pracodawcę obowiązek oceny i dokumentowania ryzyka zawodowego związanego z wykonywaną pracą oraz stosowania niezbędnych środków profilaktycznych zmniejszających ryzyko. Wymaga też, by pracodawca informował pracowników o ryzyku zawodowym, które wiąże się z wykonywaną pracą oraz o zasadach ochrony przed tymi zagrożeniami. Zapisy te odnoszą się do wszystkich zagrożeń szkodliwymi czynnikami, w tym biologicznymi. O ile zazwyczaj nie budzi to żad-

Tabela 2. Propozycje dopuszczalnych stężeń drobnoustrojów i endotoksyny w powietrzu opracowane przez Zespół Ekspertów ds. Czynniki Biologiczne Międzyresortowej Komisji ds. NDS i NDN: a) pomieszczenia robocze zanieczyszczone pyłem organicznym, mieszkalne i użyteczności publicznej; b) archiwa, muzea, magazyny muzealne i pracownie konserwacji zabytków

Table 2. Occupational exposure limit proposals for microorganisms and endotoxin in the air elaborated by the Expert Group on Biological Agents at the Polish Interdepartmental Commission for Maximum Admissible Concentrations and Intensities for Agents Harmful to Health in Working Environment: a) workplaces contaminated with organic dust, residential and public utility premises; b) archives, museums, museum storerooms and art conservation laboratories

Czynnik mikrobiologiczny (a)	Dopuszczalne stężenie	
	Pomieszczenia robocze zanieczyszczone pyłem organicznym	Pomieszczenia mieszkalne i użyteczności publicznej
Bakterie mezofilne	1,0×10 ⁵ jtk/m ³ *	5,0×10 ³ jtk/m ³
Bakterie Gram-ujemne	2,0×10 ⁴ jtk/m ³ *	2,0×10 ² jtk/m ³
Termofilne promieniowce	2,0×10 ⁴ jtk/m ³ *	2,0×10 ² jtk/m ³
Grzyby	5,0×10 ⁴ jtk/m ³ *	5,0×10 ³ jtk/m ³
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)
	Archiwa, muzea, magazyny muzealne i pracownie konserwacji zabytków	
Czynnik mikrobiologiczny (b)	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)	5,0×10 ³ jtk/m ³	–
Grzyby (ogółem)	5,0×10 ³ jtk/m ³	–
Bioaerozol (bakterie i grzyby razem)	–	1,5×10 ² jtk/m ³
Czynniki z grupy 3. i 4. zagrożenia	0 jtk/m ³	0 jtk/m ³

* w odniesieniu do frakcji respirabilnej proponowane wartości powinny być o połowę niższe
jtk – jednostka tworząca kolonię; JE – Jednostka Endotoksyczna

Tabela 3. Propozycje oceny stopnia zanieczyszczenia mikrobiologicznego powietrza zewnętrznego (atmosferycznego)
Table 3. Proposals for the assessment of microbial contamination of outdoor (atmospheric) air

Składnik bioaerozolu	Stopień zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego	
	Akceptowalny	Nieakceptowalny
Bakterie (razem)	≤5,0×10 ³ jtk/m ³	>5,0×10 ³ jtk/m ³
Bakterie Gram-ujemne	≤2,0×10 ² jtk/m ³	>2,0×10 ² jtk/m ³
Termofilne promieniowce	≤2,0×10 ² jtk/m ³	>2,0×10 ² jtk/m ³
Grzyby	≤5,0×10 ³ jtk/m ³	>5,0×10 ³ jtk/m ³
Czynniki z grupy 3. i 4. zagrożenia	0 jtk/m ³	0 jtk/m ³
Endotoksyna	≤5 ng/m ³ (≤50 JE/m ³)	>5 ng/m ³ (>50 JE/m ³)

jtk – jednostka tworząca kolonię; JE – Jednostka Endotoksyczna

nych wątpliwości w odniesieniu do czynników chemicznych czy fizycznych, w przypadku czynników pochodzenia biologicznego zapisy te są zdumiewająco często ignorowane.

Jest faktem, co potwierdza EU-OSHA, że zarządzanie ryzykiem związanym z narażeniem na czynniki biologiczne jest procesem skomplikowanym [5]. Problemy wynikają tu przede wszystkim z trudności w przeprowadzeniu oceny zagrożeń biologicznych, braku precyzyjnych informacji dotyczących narażenia na SCB, braku wiedzy na temat ich szkodliwości, braku właściwego zabezpieczenia środowiska pracy i odpowiednich procedur postępowania w sytuacjach awaryjnych. Problem w tym, że w przeciwieństwie do pozostałych zagrożeń, nieświadomość istnienia problemu

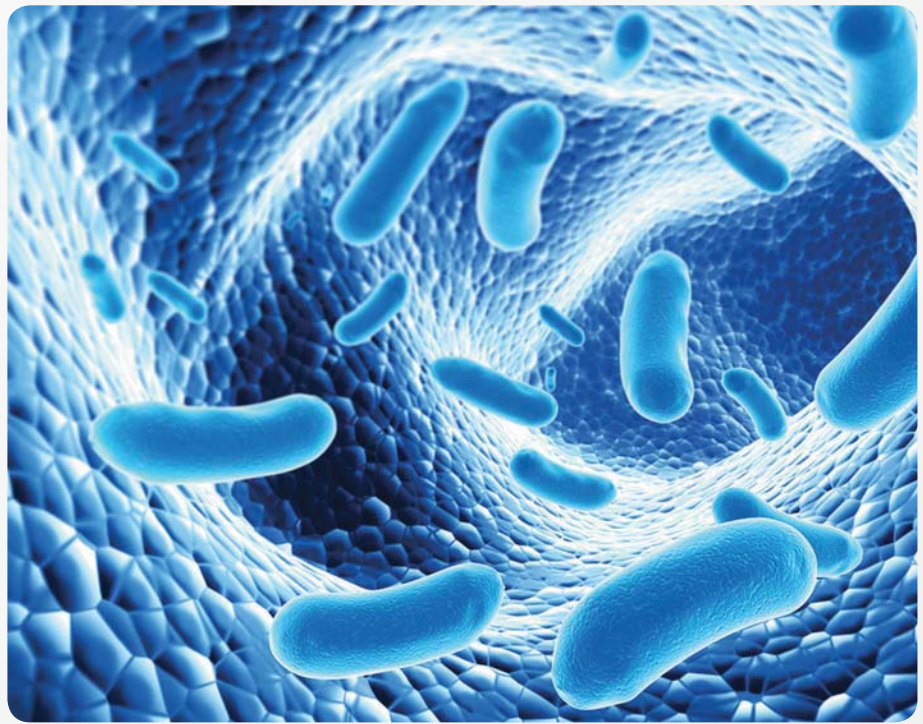
skazania biologicznego kończy się zwykle rezygnacją z ich kontroli zarówno przez władze lokalne, jak i pracodawców, co stwarza realne zagrożenie dla zdrowia pracowników.

Dla większości SCB, dokładny opis zależności dawka-odpowiedź nie jest możliwy do ustalenia. Jednym z powodów takiego stanu rzeczy jest nieadekwatność metod analitycznych stosowanych w ocenie narażenia na bioaerozole. Przeróżne i czasowe zmiany stężenia cząstek zazwyczaj nie pozwalają na pomiar ich maksymalnego możliwego stężenia. Tradycyjne metody pobierania próbek bioaerozoli i ich analizy są nakierowane na ocenę żywotności form przetrwalnych i wegetatywnych drobnoustrojów, pomijając rolę cząstek nieżywych i drobnych frag-

mentów ich elementów strukturalnych. Jednak cząstki nieożywione pochodzenia biologicznego, które są w środowisku obecne w dużo większej liczbie (np. bioaerazol żywy stanowi od 0,1 do 25% tzw. bioaerozolu całkowitego) mogą wykazywać reaktywność immunologiczną i wywoływać liczne niepożądane skutki zdrowotne. Fakt ten powinien być brany pod uwagę przy ocenie narażenia przy użyciu najczęściej dziś stosowanych metod pomiarowych bazujących na ocenie liczby cząstek żywych. Ponadto, szereg badań wykazuje, że narażenie indywidualne na SCB jest zazwyczaj wyższe od takowego mierzonego jednocześnie w sposób stacjonarny. W badaniach, w których bazowano na pomiarach indywidualnych, istotna statystycznie korelacja pomiędzy narażeniem na SCB, a wywołanym skutkiem zdrowotnym była obserwowana dwukrotnie częściej niż przy użyciu metod wykorzystujących pomiar stacjonarny, co pokazuje, iż w przypadku SCB pomiary indywidualne powinny stanowić metodę z wyboru [14, 15].

Dopuszczalne wartości stężeń SCB w środowisku pracy

W skali światowej wciąż brak jest powszechnie uznanych wartości dopuszczalnych stężeń SCB. Głównym tego powodem jest najprawdopodobniej, przyjmowane zazwyczaj w takiej sytuacji, założenie „medyczne”, oparte na braku potwierdzonych pomiarowo i epidemiologicznie zależności pomiędzy narażeniem na działanie SCB a wystąpieniem określonych skutków zdrowotnych. Również wrażliwość organizmu i siła reakcji immunologicznej wywołanej działaniem konkretnego czynnika (-ów) jest cechą osobniczą, co sprawia, że precyzyjny opis relacji „dawka-skutek zdrowotny” w odniesieniu do większości SCB nie jest prawdopodobnie możliwy. Rozsądnym podejściem alternatywnym wydaje się zatem być określenie wartości dopuszczalnych stężeń SCB na podstawie „filozofii środowiskowej”. Zgodnie z nią, wielokrotny pomiar stężenia SCB w danym środowisku (lub określonym jego elemencie) powinien umożliwić określenie, co w stosunku do danego środowiska (lub jego elementu) jest „typowe i dopuszczalne”, a co nie [16]. Wobec braku aktów prawnych formułujących wartości dopuszczalnych stężeń czynników biologicznych w środowisku pracy, przy niewątpliwej społecznej potrzebie takich regulacji, wszędzie tam, gdzie jest to praktycznie możliwe, a przede wszystkim naukowo uzasadnione, Zespół Ekspertów ds. Czynników Biologicznych Międzyresortowej Komisji ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy systematycznie opracowuje propozycje wartości dopuszczalnych



Fot. Frenta/Bigstockphoto

stężeń. Obecnie ograniczone są one do oceny zanieczyszczenia powietrza drobnoustrojami i endotoksyną bakteryjną (tabela 2.-3.). Wartości te pomyślane zostały jako referencyjne, stanowiące punkt odniesienia i pomoc przy interpretacji wyników pomiarów. Zalecenia te mogą być pomocne nie tylko przy ocenie narażenia na SCB w środowisku pracy czy wewnątrz, ale i w podejmowaniu odpowiednich działań profilaktycznych i prewencyjnych.

Ocena bezpieczeństwa biologicznego w środowisku pracy – bieżące i nowe wyzwania

Dynamiczny rozwój naukowy i techniczny, szczególnie w obszarze metod analitycznych sprawia, że dziś ograniczenie działań diagnostycznych w zakresie kontroli higienicznej środowiska pracy do oceny ilościowej i jakościowej żywych SCB jest absolutnym minimum, niezbędnym dla oszacowania ryzyka zdrowotnego osób zatrudnionych w narażeniu na nie. Szerokie rozpowszechnienie instrumentarium pomiarowego w postaci wielostopniowych impaktorów kaskadowych sprawiło, że stosunkowo łatwo jest uzyskać dane nie tylko na temat stężenia SCB w powietrzu, ale i rozkładu ziarnowego mikrobioty. Rozkłady te, przy jednoczesnym uwzględnieniu naturalnych rozmiarów dominujących w powietrzu drobnoustrojów, pozwalają na określenie form ich występowania oraz głębokości penetracji w układzie oddechowym, a dzięki temu, na prognozę potencjalnych skutków zdrowotnych inhalacyjnego narażenia.

Jak wcześniej wspomniano, znaczącą część mikrobioty stanowią drobnoustroje żywe, ale niezdolne do wzrostu oraz ich martwe komórki. Uwzględniając fakt, że w środowisku obecne są również (w liczbie kilkusetkrotnie przekraczającej liczbę komórek) submikro-nowe fragmenty struktur mikroorganizmów, różnica w stężeniu bioaerozolu żywego w porównaniu z całkowitym jest jeszcze bardziej wyraźna [17]. Zastosowanie zatem w monitoringu mikrobiologicznym strategii pomiarowej, opartej na równoczesnym pomiarze bioaerozolu całkowitego i żywego, pozwala z większą precyzją oceniać stopień zanieczyszczenia środowiska i prognozować wielkość narażenia na SCB [14]. W tym ostatnim aspekcie warto również zwrócić uwagę na fakt, że dostępna jest już technologia umożliwiająca kwantyfikację procesu aerolizacji cząstek drobnoustrojów z ich środowiskowego źródła przez ocenę wielkości emisji pod wpływem istotnych dla tego procesu parametrów fizycznych i z uwzględnieniem ich biologicznych właściwości. Sformułowana kilka lat temu koncepcja „mikrobiologicznej siły źródła” łączy w nowy sposób źródło zanieczyszczenia (np. skażoną mikrobiologicznie powierzchnię) z jego receptorem (człowiekiem). Umożliwia ona ocenę największego potencjalnego narażenia na SCB przez określenie maksymalnej emisji pełnych komórek oraz ich fragmentów, uniezależniając ją od tego, czy poddane procesowi aerolizacji cząstki są żywe, czy martwe i czy sam proces emisji podlega zmianom czasowym i przestrzennym [17, 18].

W ocenie jakościowej, coraz częściej klasyczne metody hodowlane i biochemiczne pozwalające określić przynależność taksonomiczną badanych drobnoustrojów są uzupełniane lub zastępowane metodami molekularnymi, których zaletą jest ukierunkowanie na analizę materiału genetycznego, który w odniesieniu do każdego organizmu jest unikalny i względnie stały (w porównaniu z cechami fenotypowymi). Metody molekularne pozwalają nie tylko na jednoznaczne różnicowanie międzygatunkowe, ale i na wykazanie zróżnicowania szczepów w obrębie danego gatunku. Ponadto, ich przewagą wobec metod klasycznych jest również to, że nie są one ograniczone do ściśle określonej liczby organizmów. Przykładem mogą być tu metody typowania genetycznego stosowane z powodzeniem zarówno w badaniach rozprzestrzeniania się drobnoustrojów w powietrzu, jak i weryfikacji ich obecności u osób narażonych na inhalację bioaerozolu. Należy w tym miejscu podkreślić, że metody genotypowe nie zastępują metod tradycyjnych opartych na ocenie ilościowej i jakościowej komórek wegetatywnych lub spor mikroorganizmów, ale je uzupełniają. Można więc przypuszczać, że w najbliższych latach staną się częścią standardowej, rutynowej praktyki badań środowiskowych [19].

W ostatnich latach prowadzone są intensywne badania mające na celu udoskonalanie i usprawnianie metod identyfikacji cząstek biologicznych w czasie rzeczywistym. Do wykrywania czynników biologicznych wykorzystuje się tu między innymi technikę pomiaru intensywności światła laserowego rozproszonego na cząstkach bioaerozoli oraz fluorescencję związaną z ich metaboliczną aktywnością. Zaletą tych technik jest zdolność szybkiego analizowania SCB wraz z generowaniem sygnału ostrzegającego o przekroczeniu poziomów dopuszczalnych, co w środowisku pracy może mieć szczególne znaczenie w przypadku masowych zagrożeń powodowanych np. przez awarie [20].

Nowe wyzwania w dziedzinie ochrony zdrowia przed SCB w środowisku pracy, którym nauka stawiać będzie czoła w najbliższych latach to m.in. opracowywanie i wykorzystywanie biosensorów. Powinny one umożliwiać wykrywanie i pomiar określonych parametrów lub związków chemicznych oraz biologicznych efektów wywołanych ich działaniem (np. toksyczność całkowitą lub genotoksyczność). Opierając się na pełnych lub genetycznie zmodyfikowanych komórkach drobnoustrojów, biosensory powinny umożliwiać wykrywanie biorozpoznawalnych instrumentalnie elementów, np. rekombinowanych białek produkowanych w obecności substancji efektorowych działających na geny.

Fascynującym problemem będzie też opracowywanie i wdrażanie nowych materiałów

i technik eliminujących skażenie biologiczne ze środowiska pracy, np. nanomateriałów (fulerenów, nanocząstek, dendrymerów, liposomów, nanopowłok) – zarówno w celu minimalizowania niekorzystnych skutków oddziaływania SCB, jak i terapii chorób nimi wywołanych. W wymiarze środowiskowym byłoby to szybkie rozpoznanie obecności i aktywności źródeł SCB w środowisku pracy oraz skuteczna introdukcja pod jego wpływem wysokosprawnych metod ich eliminacji. W wymiarze medycznym byłaby to tzw. spersonalizowana terapia. W tego typu leczeniu, rozpoznanie niekorzystnych symptomów lub choroby (np. wywołanej działaniem drobnoustrojów zakaźnych) następowałoby m.in. poprzez wprowadzenie do organizmu osoby narażonej biosensorów lub nanocząstek sygnałowych informujących o pojawieniu się niekorzystnych zmian znacznie wcześniej, tj. jeszcze w fazie, w której negatywne działanie SCB mogłoby zostać znacząco ograniczone lub wręcz wyeliminowane. Następtwem takiego rozpoznania mogłoby być dostarczenie odpowiedniego leku bezpośrednio do komórek objętych procesem chorobowym w sposób szybki i wydajny lub wprowadzenie do organizmu chorego substancji lub związków modelujących jego odpowiedź immunologiczną w pożądanym terapeutycznie kierunku.

Podsumowanie

Narażenie na szkodliwe czynniki biologiczne powszechnie występujące w środowisku pracy może być przyczyną wystąpienia wielu niekorzystnych skutków zdrowotnych. Choć ochrona pracowników przed ryzykiem związanym z tego rodzaju narażeniem jest prawnym wymogiem narzuconym przez dyrektywę 2000/54/WE i wywodzące się z niej rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 22 kwietnia 2005 r., to nadal zarówno kontrola SCB, jak i, często będące jej konsekwencją, zapewnienie bezpiecznych warunków pracy nie są w wielu środowiskach zawodowych traktowane z należytą powagą. Sytuacja ta powinna szybko ulec zmianie, a dostępna już dziś wiedza z tej dziedziny oraz szerokie upowszechnienie narzędzi służących precyzyjnej kwantyfikacji i ocenie narażenia na SCB powinno skutkować jeśli nie wyeliminowaniem, to znaczącym ograniczeniem zagrożeń biologicznych w środowisku pracy.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Dyrektywa 2000/54/WE Parlamentu Europejskiego oraz Rady z dnia 18 września 2000 r. dotycząca ochrony pracowników przed ryzykiem związanym z narażeniem na czynniki biologiczne w miejscu pracy. „Official Journal of the European Communities”, L. 262/21, Bruksela 17.10.2000, 21-45
- [2] 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. DzU z 2005 r. nr 81, poz. 716 ze zm.: DzU z 2008 r. nr 48, poz. 288

- [3] Bisen P.S., Debnath M., Prasad G.B.K.S. *Microbes: concepts and applications*. Wiley-Blackwell, Hoboken 2012
- [4] Dutkiewicz J., Śpiewak R., Jabłoński L., Szymańska J. *Biologiczne czynniki zagrożenia zawodowego. Klasyfikacja, narażone grupy zawodowe, pomiary, profilaktyka*. Ad punctum, Lublin 2007
- [5] EU-OSHA – European Agency for Safety and Health at Work: *Expert forecast on emerging biological risks related to occupational safety and health. European risk observatory report*. Office for Official Publications of the European Communities, Luksemburg 2007
- [6] Szeszenia-Dąbrowska N., Wilczyńska U., Sobala W. *Choroby zawodowe w Polsce w 2012 r.* Instytut Medycyny Pracy, Łódź 2013
- [7] Szeszenia-Dąbrowska N., Wilczyńska U., Sobala W. *Choroby zawodowe w Polsce w 2011 r.* Instytut Medycyny Pracy, Łódź 2012
- [8] Cox C.S., Wathes C.M. *Bioaerosols handbook*. Lewis Publishers/CRC Press, Inc., Boca Raton 1995
- [9] Lighthart B., Stetzenbach L.D. *Distribution of microbial bioaerosol*. W: Lighthart B., Mohr A.J. (red.). *Atmospheric microbial aerosols: theory and applications*. Chapman and Hall, Inc., Nowy Jork 1994
- [10] Stetzenbach L. *Introduction to aerobiology*. W: Hurst C.J. (red.). *Manual of environmental microbiology*. ASM Press, Waszyngton 1997
- [11] Kulkarni P., Baron P.A., Willeke, K. (red.). *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. John Wiley & Sons, Inc., Nowy Jork 2011
- [12] Owen M.K., Ensor D.S., Sparks L.E. *Airborne particle sizes and sources found in indoor air*. „Atmospheric Environment” 1992, 26:2149-2162
- [13] Ustawa z dnia 26 czerwca 1974 r. – Kodeks Pracy. T. jedn. DzU z 1998 r. nr 21, poz. 94 ze zm.
- [14] Gołofit-Szymczak M. *Określenie narażenia na aerozol bakteryjny i grzybowy w środowisku pracy pomieszczeń biurowych z uwzględnieniem systemu wentylacyjnego budynku*. Rozprawa doktorska. Wydawnictwo CIOP-PIB, Warszawa 2012
- [15] Thorne P.S., Duchaine C., Douwes J., Eduard W., Górny R., Jacobs R., Reponen T., Schierl R., Szponar B. *Working group report 4: exposure assessment for biological agents*. „American Journal of Industrial Medicine” 2004, 46:419-422
- [16] Górny R.L. *Aerozole biologiczne – rola normatywów higienicznych w ochronie środowiska i zdrowia*. „Medycyna Środowiskowa” 2010, 13:41-51
- [17] Górny R.L. *Filamentous microorganisms and their fragments in indoor air – a review*. „Annals of Agricultural and Environmental Medicine” 2004, 11:185-197
- [18] Górny R.L., Ławniczek-Wałczyk A. *Effect of two aerosolization methods on the release of fungal propagules from contaminated agar surface*. „Annals of Agricultural and Environmental Medicine” 2012, 19: 279-284
- [19] Frączek K. *Ocena narażenia na drobnoustroje w strefie oddziaływania składowiska odpadów komunalnych*. Zeszyt naukowy 504/381. Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego, Kraków 2013
- [20] Ruzer L.S., Harley N.H. *Aerosols handbook. Measurement, dosimetry, and health effects. 2nd edition*. CRC Press. Taylor & Francis Group, Boca Raton 2013

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy-Państwowy Instytut Badawczy.