

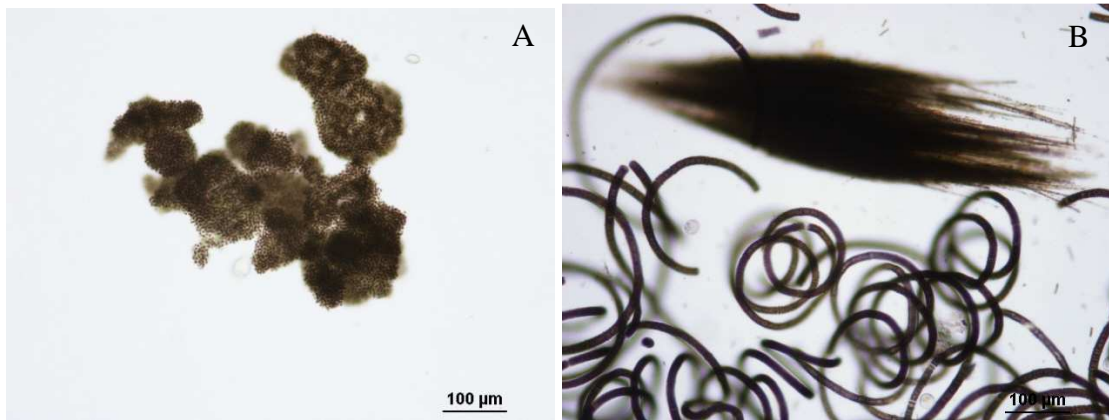
Opracowanie na temat przyczyn występowania i zagrożeń wynikających z obecności potencjalnie toksycznych cyjanobakterii (sinic) w wodzie

1. Informacje ogólne

Sinice (cyjanobakterie) taksonomicznie należą do bakterii i zaliczane są do najstarszych organizmów występujących na Ziemi. Są to prawdziwi pionierzy świata organicznego. Większość sinic wykazuje dużą zdolność przystosowania się do warunków środowiska. Mogą osiedlać się w najbardziej niegościnnych ekosystemach. Występują w glebie, na skałach, na korze drzew, na lodowcach, a nawet w gorących źródłach, gdzie temperatura może dochodzić do +90°C. Niektóre gatunki wchodzą w skład porostów, żyją w symbiozie z wodnymi paprociami (*Azolla*), sagowcami, wątrobowcami i glikami. Występują zarówno w wodach słonych jak i śródlądowych, unosząc się swobodnie w toni wodnej pośród innych grup fitoplanktonu (m.in. zielenic, okrzemek, bruzdnic, kryptofitów, euglenin, złotowiciowców) lub tworząc maty bentosowe na dnie zbiorników. Mogą wykorzystywać szerokie spektrum światła, są odporne na złe warunki tlenowe, tolerują wysokie wartości pH. Gdy zagęszczenie sinic w wodzie nie jest zbyt duże, są one – obok innych grup organizmów – ważnym składnikiem ekosystemów wód naturalnych. W procesie fotosyntezy przetwarzają energię słoneczną w chemiczną, tworząc związki organiczne z dwutlenku węgla i wody. Ponadto produkują życiodajny tlen.

Cyjanobakterie prezentują morfologiczną różnorodność. Mogą być jednokomórkowe (np. *Synechococcus*), kolonijne (np. *Microcystis*, *Woronichinia*) lub wielokomórkowe w postaci trychomów i nici (np. *Aphanizomenon*, *Nodularia*) (Zdj. 1 A-B). Ich kolonie i nici charakteryzują się na ogół dużymi rozmiarami, co może utrudniać ich wyżeranie przez zooplankton. Oprócz typowych komórek wegetatywnych, niektóre taksony posiadają dodatkowo charakterystyczne komórki tj. heterocyty (dzięki nim mogą wiązać azot cząsteczkowy z powietrza) oraz akinety (komórki pozwalające przetrwać w niesprzyjających warunkach środowiska). Cechą specyficzną niektórych cyjanobakterii jest obecność w komórkach wakuol gazowych (aerotopów) – czyli pęcherzyków wypełnionych gazem o składzie podobnym do powietrza; umożliwiają one zmianę ciężaru właściwego komórki, a tym samym pozwalają na przemieszczanie się w kolumnie wody. Dzięki temu sinice mają możliwość korzystania z optimum światła, co przy nadmiarze soli biogenicznych stwarza doskonale warunki do intensywnego rozwoju. Obecność wakuol gazowych jest cechą

charakterystyczną większością gatunków sinic występujących masowo. Oglądając sinice przy użyciu mikroskopu świetlnego, wakuole gazowe można zauważyć jako czarne plamki w komórkach.



Zdj. 1. Przykładowe formy morfologiczne potencjalnie toksycznych sinic występujących w polskich wodach A: kolonia *Microcystis aeruginosa* oraz B: trychomy *Aphanizomenon flosaquae* ułożone w charakterystyczne wiązki oraz skręcone nici *Nodularia spumigena*

Szczególną uwagę poświęca się cyjanobakteriom, które produkują związki toksyczne. W wodach śródlądowych są to zazwyczaj gatunki z rodzaju *Microcystis*, *Dolichospermum*, *Planktothrix*, *Woronichinia*, *Aphanizomenon*, *Gloeotrichia* i *Cylindrospermopsis*. Natomiast w tropikalnych i subtropikalnych wodach oceanu, masowe zakwity tworzą gatunki z rodzaju *Trichodesmium*. Ponadto w Morzu Bałtyckim toksyczne zakwity tworzy gatunek *Nodularia spumigena*, chociaż w przybrzeżnych wodach odnotowuje się również liczne występowanie typowo słodkowodnych gatunków zwłaszcza z rodzaju *Dolichospermum* jak i *Microcystis*. Nie stwierdzono, by szczepy *Aphanizomenon flosaque* występujące w Bałtyku produkowały toksyny, w przeciwieństwie do szczepów słodkowodnych. Cyjanobakterie występują we wszystkich zbiornikach wodnych, problemem stają się jedynie wówczas, gdy wzrasta ich ilość.

2. Zakwity wody

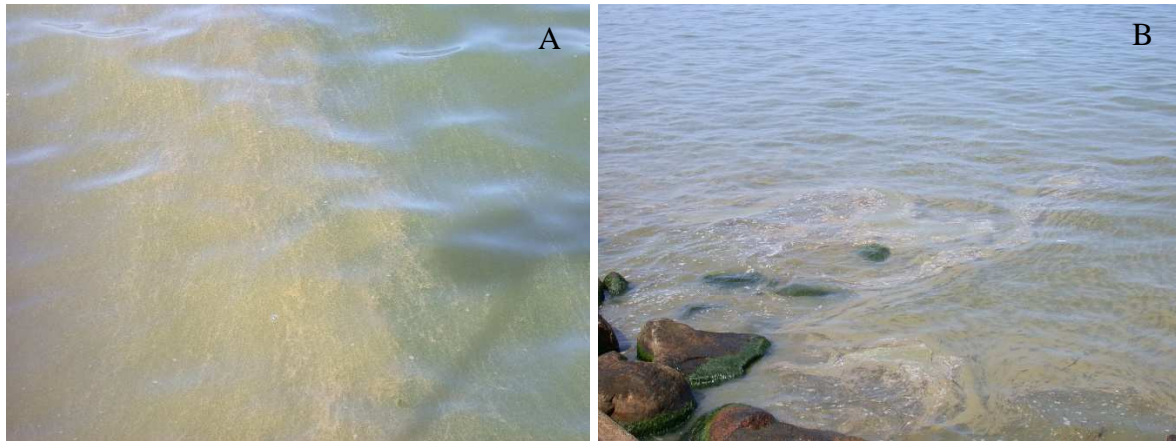
W zbiornikach wodnych w strefie klimatu umiarkowanego obserwuje się sezonowe zmiany dominacji poszczególnych grup fitoplanktonu. Pojawianie się organizmów dominujących sugeruje, iż posiadają one pewne cechy charakterystyczne, umożliwiające im lepszy wzrost w danych warunkach. Kiedy warunki środowiskowe są odpowiednie dla wzrostu, organizmy mogą występować masowo. W zbiornikach wodnych strefy umiarkowanej, zazwyczaj obserwuje się dwa wyraźne maksima liczebności i biomasy –

wiosenną i jesienną. Wówczas w planktonie dominują chłodnolubne okrzemki. Późną wiosną istotny udział w biomacie fitoplanktonu odgrywają bruzdnice. Natomiast latem w planktonie dominują zieleńce i sinice (cyjanobakterie), gdyż organizmy te preferują wyższą temperaturę wody i większe nasłonecznienie.

Pojęcie „zakwity wody” jest stosowane do opisanego dużego zagęszczenia drobnych komórek glonów lub sinic, które występują przy powierzchni wody, co często jest sygnalizowane zmianą barwy wody a na powierzchni wody można wyraźnie zaobserwować gęste smugi wyglądające jak rozlana farba, a nawet grube kożuchy piany o galaretowatej konsystencji. Smugi pojawiają się najczęściej w strefie brzegowej, gdy słaby wiatr spycha je do brzegu, mają przeważnie kolor zielony (w różnych odcieniach, Zdj. 2 A-D), żółto-brązowy (Zdj. 3 A-B), czerwony a nawet pomarańczowy, różowy czy niebieski. Zakwity wody mogą być spowodowane masowym występowaniem jednego, dwóch lub wielu gatunków mikroorganizmów – zazwyczaj są to sinice, jednak w sprzyjających warunkach mogą to być również zieleńce, złotowiciowce, kryptofity lub bruzdnice i okrzemki (zwłaszcza w morzach i oceanach).



Zdj.2. Masowe zakwity sinic w jeziorach kaszubskich



Zdj. 3. Masowe zakwity sinic w Zatoce Gdańskiej

Nie należy mylić sinic z makroglonami, które mogą unosić się przy powierzchni wody w strefie brzegowej jezior czy Morza Bałtyckiego. Często fale wyrzucają na brzeg plaż te zielone maty, które choć nie wyglądają estetycznie i w wyniku rozkładu przez bakterie mogą wydzielać nieprzyjemny zapach, to same nie są szkodliwe i nie są źródłem toksyn.

Przyczyny pojawiania się zakwitów wody

Sezonowość masowych zakwitów cyjanobakterii jest naturalnym zjawiskiem występującym w przyrodzie, któremu towarzyszy zmętnienie wody i jej zabarwienie. Czasem zaobserwować można również pianę i kożuchy oraz odczuć charakterystyczny zapach. Na podstawie badań paleontologicznych stwierdzono, iż epizody masowego występowanie sinic w wodach Morza Bałtyckiego miały miejsce prawdopodobnie już 7000 lat p.n.e. Zjawisko zakwitów z czasem nasiliło się, co jest związane ze wzrostem eutrofizacji Bałtyku oraz wzrostem temperatury wody w wyniku globalnego ocieplenia.

Cechy sinic decydujące o ich dominacji w fitoplanktonie:

- mogą wykorzystywać szerokie spektrum światła;
- dzięki heterocytom mogą wiązać azot atmosferyczny;
- obecność wakuol gazowych umożliwia im pływalność w toni wodnej;
- dzięki dużym rozmiarom są bardziej odporne na wyjadanie przez zooplankton;
- produkują toksyny, które mogą wpływać hamująco na rozwój innych organizmów.

Czynniki środowiska wpływające na pojawianie się sinicowych zakwitów wody:

- temperatura wody powyżej 16-20 °C (choć znane są zakwity sinic i w niższych temperaturach);
- dostępność soli biogenicznych (zwłaszcza fosforanów);
- słaby wiatr;
- niewielkie mieszanie kolumny wody;
- brak opadów.

Przewidywanie występowania zakwitów wody jest bardzo trudne, gdyż istotne znaczenie mają tu zmienne warunki pogodowe, takie jak nasłonecznienie, wiatr czy deszcz. Dlatego nie da się przewidzieć, kiedy się pojawi i jak długo będzie utrzymywał się zakwit w danym zbiorniku wodnym. Z reguły w miejscach osłoniętych od wiatru, zatoczkach, gdzie jest mniejsze falowanie i mieszanie wód, zakwit może utrzymywać się znacznie dłużej niż na otwartej przestrzeni. Z drugiej strony, powszechnie wiadomo, gdyż wskazują na to liczne zdjęcia satelitarne – masowe pojawianie się toksycznej sinicy *Nodularia spumigena* obserwowane jest w centralnej części Morza Bałtyckiego. U wybrzeży Zatoki Gdańskiej masowy zakwit może być odnotowywany tylko na części plaż, a jest to związane z kierunkiem i siłą wiatru, który może przesuwać powierzchniowy zakwit nawet w ciągu kilku godzin. Z reguły nagłe załamanie pogody, silne wiatry, falowanie i mieszanie wód powodują rozbitcie zakwitu, a w konsekwencji obumieranie komórek i opadanie ich na dno zbiornika.

Skutki zakwitów wody

Niezależnie od tego czy zakwity są spowodowane sinicami produkującymi związki szkodliwe czy nie, masowy ich rozwój jest zjawiskiem niekorzystnym. Zaburza równowagę w ekosystemie, gdyż może prowadzić do obniżenia bioróżnorodności poprzez dominację jednego lub kilku gatunków fitoplanktonowych. Nadmiar materii organicznej pojawiającej się podczas masowego zakwitu powoduje wyczerpanie zasobów tlenu, ponieważ te mikroorganizmy nie tylko go produkują, ale również zużywają w procesach oddychania komórkowego. W konsekwencji może prowadzić to do rozkładu materii organicznej w warunkach beztlenowych, co prowadzi do wytworzenia siarkowodoru – związku zabójczego dla wielu organizmów. Efektem tego jest wymieranie fauny dennej i innych organizmów wodnych. Skutkiem zakwitów jest również obniżenie przezroczystości wody,

a co za tym idzie zmniejszenie głębokości na którą docierają promienie słoneczne, uniemożliwiając tym samym wzrost roślin wodnych (makrofitów). Obserwowane śnięcia ryb niekoniecznie spowodowane są obecnością wysokich stężeń toksyn (zwłaszcza tych o silnej toksyczności), mogą one wynikać z tzw. przyduchy – unoszące się przy powierzchni wody kożuchy mogą ograniczać nie tylko dostęp do światła ale i ilość tlenu niezbędną do życia innym organizmom wodnym. Zakwity sinic obniżają walory rekreacyjne kąpielisk.

Wrażenie „zakwitów wody” mogą dawać też duże ilości pyłków drzew – zwłaszcza sosny, które wiosną mogą być przenoszone przez wiatr nawet na duże odległości i opadać na powierzchnię wody. Przez wiatr i falowanie wody pyłek może być przenoszony w przybrzeżną strefę jeziora, powodując wyraźne żółte zabarwienie wody (Zdj. 4). Podobne zjawisko można obserwować również wiosną u wybrzeży Bałtyku.



Zdj. 4. Pyłki sosny na brzegu jeziora Tuchomskiego

Na podstawie obserwacji zmętnienia czy zmiany zabarwienia wody nie można stwierdzić, czy nastąpił sinicowy zakwit wody. Niezbędne jest wykonanie analizy mikroskopowej. Należy jednak podkreślić, iż pomimo tego, że monitoring zakwitu wody poddawanej uzdatnieniu i wody na kąpieliskach często jest oparty o mikroskopowe zliczanie liczby komórek, określanie biomasy fitoplanktonu oraz pomiar koncentracji chlorofilu-a, to te parametry służą jedynie ocenie potencjalnego zagrożenia związanego z obecnością potencjalnie toksycznych gatunków sinic w wodzie. Określenie koncentracji chlorofilu-a w litrze wody nie wystarcza do oszacowania stężenia toksyn sinicowych, ponieważ wszystkie sinice oraz organizmy eukariotyczne zdolne do przeprowadzenia fotosyntezy zawierają ten barwnik. Co więcej, nie wszystkie gatunki sinic występujące masowo produkują toksyny,

dotatkowo nie wszystkie szczepy gatunku zdolnego do produkcji toksyn syntetyzują te szkodliwe substancje. Dlatego jeśli stwierdzi się, iż zakwit tworzą jedynie gatunki sinic mogące produkować toksyny (gatunki/szczepy potencjalnie toksyczne), to bez dodatkowych analiz chemicznych, immunologicznych lub genetycznych nie można stwierdzić na 100%, że w wodzie obecne będą toksyny. Nie stwierdzono również prostej korelacji pomiędzy ilością potencjalnie toksycznych gatunków sinic a stężeniem toksyn. Może się zdarzyć, iż wyższe stężenie toksyn stwierdzi się przy zliczeniu mniejszej liczby komórek sinicowych lub stężenie toksyn może być niższe, choć liczba osobników potencjalnie toksycznych sugerowałaby znacznie wyższą toksyczność.

3. Toksyny produkowane przez sinice i zagrożenie zdrowotne związane z ich występowaniem

Masowe występowanie cyjanobakterii (sinic) wpływa negatywnie na funkcjonowanie środowisk wodnych. Zjawisko to może również obniżać jakość wód użytkowych. Sinice są bowiem producentem związków o negatywnym działaniu na organizm człowieka i zwierząt. Poznano wiele metabolitów tych mikroorganizmów należących m.in. do hepatotoksyn, neurotoksyn, cytotoxyn i dermatotoksyn. Objawy chorobowe i dolegliwości, które ujawniają się w wyniku sporadycznego lub chronicznego kontaktu z sinicami, są efektem addytywnego lub synergicznego działania produkowanych przez nie metabolitów. Najczęściej związki te przenikają do organizmu człowieka wraz z komórkami cyjanobakterii, np. na skutek przypadkowego połknięcia wody lub wdychania toksycznych aerozoli, podczas pływania lub uprawiania innych sportów wodnych. Znane są także przypadki śmiertelnych zatruc ludzi dializowanych wodą zawierającą toksyny sinicowe.

Znanych jest około 2 000 gatunków sinic, spośród których około 40 produkuje związki o działaniu toksycznym. Dotychczas zidentyfikowano około 120 metabolitów wtórnych działających cytotoxycznie (toksycznie dla komórek). Szacuje się, iż ponad 50% zakwitów sinic tworzonych jest przez gatunki toksyczne. Przy tym jeden szczep cyjanobakterii może produkować wiele różnych związków szkodliwych, a te same związki mogą być produkowane przez różne gatunki sinic. Poniżej omówiono najważniejsze grupy toksyn sinicowych, których szkodliwe działanie na ludzi i zwierzęta zostało wielokrotnie udokumentowane. Toksyny wydzielane są do środowiska, gdy komórki sinic starzeją się i tracą swoją zawartość. Zwierzęta najczęściej ulegają zatruciu, gdy spożywają całe mikroorganizmy, może jednak zdarzyć się, że piją wodę zawierającą jedynie uwolnione z

nich toksyny. Dawka skażonej cyjanotoksynami wody powodująca śmierć zależy od rodzaju i ilości toksyny oraz gatunku, wieku, wielkości i płci zwierzęcia.

Spośród **hepatotoksyn**, związków działających toksycznie na komórki wątroby, wyróżniamy mikrocystyny oraz nodularyny. Najczęściej produkowane są one przez sinice z rodzaju *Microcystis*, *Planktothrix*, *Dolichospermum*, *Nostoc*, *Nodularia* (Tab.1). Niewielkie dawki hepatotoksyn w wodzie pitnej wywołują u ludzi przejściowe zaburzenia żołądkowe, jelitowe, wątrobowe, wysypkę, gorączkę, wymioty, biegunkę, ostre uszkodzenie wątroby, przyspieszają rozwój guzów nowotworowych. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że systematyczne przyjmowanie niewielkich dawek toksyn prowadzi do chronicznych zaburzeń funkcjonowania układu pokarmowego i wątroby. Przy silnym zatruciu mogą wystąpić wewnętrzne krwotoki, niewydolność fizjologiczna wątroby i śmierć organizmu. Hepatotoksyny są substancjami stabilnymi w wysokiej temperaturze, zatem gotowanie wody nie powoduje ich rozpadu. Bardzo wolno ulegają dekompozycji w wodzie. Są bardzo stabilne zarówno w środowisku kwaśnym, jak i zasadowym, tak więc soki żołądkowe oraz żadne enzymy trawienne nie są w stanie ich rozłożyć. Nieznane jest dotąd żadne antidotum czy terapia redukująca ich toksyczny efekt po wniknięciu do organizmu.

Neurotoksyny sinicowe odpowiedzialne są za zaburzenia funkcjonowania układu nerwowo-mięśniowego. Najczęściej notowaną w polskich wodach neurotoksyną jest anatoksyna-a wytwarzana przez różne szczepy cyjanobakterii najczęściej z rodzaju *Dolichospermum*, *Aphanizomenon* i *Planktothrix* (Tab. 1). W krótkim czasie po zatruciu występują objawy w postaci drżenia mięśni, zachwiania równowagi oraz dolegliwości brzuszne. Atak na mięśnie oddechowe powoduje konwulsje (na skutek niedotlenienia mózgu) i śmierć (często w zaledwie kilku minut) następuje poprzez uduszenie w wyniku uszkodzenia mięśni oddechowych. Niestety nie znaleziono dotychczas skutecznego antidotum. Oprócz anatoksyny-a sinice są zdolne syntezować anatoksynę-a(s), neurotoksyczny aminokwas BMAA oraz saksitoksyny.

Jedną z toksyn o działaniu cytotoksycznym jest **cylindrospermopsyna**. Związek ten produkowany jest głównie przez cyjanobakterie z gatunku *Cylindrospermopsis raciborskii*. Cylindrospermopsynę zidentyfikowano również u sinic z rodzaju *Aphanizomenon*, *Umezakia*, *Anabaena* i *Raphidiopsis*. Toksyna ta indukuje śmierć komórek wątroby oraz hamuje syntezę białka; sądzi się, iż uszkadza ona również strukturę DNA i RNA, jest potencjalnym czynnikiem rakotwórczym. Wykazano, iż czysty związek uszkadza wątrobę natomiast surowy ekstrakt z komórek cyjanobakterii wywołuje patologiczne zmiany również w nerkach, śledzionie, grasicy i sercu.

Dermatotoksyny, do których zalicza się debromoaplysiatoksynę lyngbyatoksynę oraz aplysiatoksynę syntetyzowane przez sinice z rodzaju *Lyngbya*, *Schizothrix* i *Oscillatoria*, są przyczyną chorób skórnych. Objawy w postaci swędzenia skóry, pieczenia, obrzęku czy zaczerwienienia pojawiają się po kilku godzinach od kąpieli w wodzie zawierającej te toksyny.

Stosowany często w literaturze termin – toksyczność sinic – nie zawsze obrazuje poziom produkowanych toksyn. Toksyczność związków produkowanych przez sinice definiowana jest zazwyczaj za pomocą współczynnika LD₅₀, określającego dawkę toksyn powodującą śmiertelność połowy badanej populacji zwierząt. Niektóre szczepy cyjanobakterii mogą produkować kilka typów toksyn o różnym stopniu toksyczności. Bardziej precyzyjne jest więc określanie stężenia produkowanych toksyn w odniesieniu do jednostki masy sinic, objętości porcji/próbki lub stężenia całkowitego białka w komórce.

Tabela 1. Toksyny cyjanobakterii

Toksyny	Rodzaj cyjanobakterii	Miejsce działania	Mechanizm działania
Hepatotoksyny			
Mikrocystyny	<i>Microcystis</i> , <i>Dolichospermum</i> , <i>Anabaenopsis</i> , <i>Planktothrix</i> , <i>Nostoc</i> , <i>Hapalosiphon</i>	wątroba, układ pokarmowy	inhibicja fosfataz białkowych (PP1 i PP2A)
Nodularyny	<i>Nodularia</i>		inhibicja fosfataz białkowych (PP1 i PP2A)
Cytotoksyny			
Cylindrospermopsyna	<i>Cylindrospermopsis</i> <i>Aphanizomenon</i> , <i>Umezakia</i> <i>Anabaena</i> , <i>Raphidiopsis</i>	wątroba, inne komórki	inhibicja syntezy białek, uszkodzenie DNA
Neurotoksyny			
Anatoksyna-a	<i>Dolichospermum</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Cylindrospermum</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Planktothrix</i> , <i>Phormidium</i> , <i>Microcystis</i>	komórki nerwowe	agonista neuroprzekaźnika acetylocholinę
Anatoksyna-a(s)	<i>Dolichospermum</i>	komórki nerwowe	inhibicja aktywności acetylocholinoesterazy
Saksitoksyny	<i>Aphanizomenon</i> , <i>Dolichospermum</i> <i>Oscillatoria</i> , <i>Lyngbya</i> , <i>Cylindrospermopsis</i> , <i>Planktothrix</i>	komórki nerwowe	blokowanie kanałów sodowych w komórkach nerwowych
BMAA	większość cyjanobakterii	komórki nerwowe	agonista glutaminianu
Dermatotoksyny			
Aplysiatoksyny	<i>Lyngbya</i> , <i>Schizothrix</i> , <i>Planktothrix</i>	skóra	reakcje alergiczne
Lyngbyatoksyny	<i>Lyngbya</i>	skóra, układ pokarmowy	aktywatory kinazy białkowej C
Lipopolisacharydy	większość cyjanobakterii	różne komórki	inhibicja aktywności GST

4. Jak uchronić się przed negatywnymi skutkami zakwitu ?

- unikać kontaktu z kożuchem sinicowym i wodą o zmienionej barwie i nieprzyjemnym zapachu,
- nie poić nią zwierząt domowych,
- nie używać jej do podlewania warzyw.

Ostrzeżenie !!!

U osób, które napiły się wody z zakwitem lub pływały w kożuchach glonów, mogą pojawić się następujące dolegliwości:

- wysypka na skórze,
- swędzenie i łzawienie oczu,
- wymioty,
- biegunka,
- gorączka,
- bóle mięśni i stawów.

Dolegliwości te mogą wystąpić bezpośrednio lub kilka dni po kąpieli w wodzie, gdzie był toksyczny zakwit sinic. Od dłuższego czasu nie odnotowano przypadków śmiertelnych wśród ludzi, jednakże w kilku sytuacjach zachorowania były bardzo poważne. Chociaż zakwity sinic nie zawsze są niebezpieczne, ostrożność nakazuje by unikać kontaktu z kożuchem sinicowym i wodą o zmienionej barwie.

5. Losy cyjanotoksyn w środowisku

W trakcie gdy sinice aktywnie się rozmnażają, cyjanotoksyny pozostają głównie w ich komórkach. Do otaczającego środowiska, metabolity te uwalniane są, gdy sinice się starzeją, obumierają i ich komórki ulegają rozpadowi (lizie).

Następnie, w zależności od dynamiki wód zbiornika, stężenia rozpuszczonych cyjanotoksyn mogą się zmieniać, na skutek mieszania się mas wody. Eliminacja tych metabolitów z ekosystemu zachodzi również na drodze fotodegradacji (rozkład związku pod wpływem światła, zwłaszcza UV), sorpcji na zawieszynie i w osadach, akumulacji w organizmach żywych i biodegradacji (rozkład związku przez organizmy, głównie bakterie i grzyby). Tempo usuwania poszczególnych cyjanotoksyn ze środowiska wodnego zależy od ich struktury chemicznej, stężenia, parametrów fizyko-chemicznych wody (np. pH, obecność

kwasów humusowych). Poszczególne hepatotoksyny, deramtoksyny, neurotoksyny i cytotoksyny charakteryzują się więc różną trwałością.

Najczęściej notowane w polskich wodach, hepatotoksyczne mikrocytyny, są bardzo stabilne. W osadach, identyfikowane są często wiele miesięcy po zakwicie sinic. Zagotowanie wody zawierającej te metabolity, nie powoduje ich degradacji. Biodegradacja, prowadzona przez bakterie heterotroficzne, jest najefektywniejszym procesem powodującym usunięcie mikrocytyn ze środowiska. Zidentyfikowano ponad 50 szczepów bakterii zdolnych do rozkładu tych toksyn. Bakterie te izolowano z wód i osadów, oczyszczalni ścieków a także np. jelit przeżuwaczy. Większość z nich należy do typu Proteobacteria. Pojedyncze publikacje wskazują, iż proces biodegradacji mikrocytyn mogą prowadzić też organizmy eukariotyczne: mikroglony, grzyby, czy nawet rośliny wodne.

Inne cyjanotoksyny nie są, aż tak trwałe w środowisku. Cytotoksyczna cylindrospermopsyna i neurotoksyczna anatoksyna-a są stabilne tylko w ciemności. Doświadczalnie udowodniono, że w obecności światła proces rozkładu tych metabolitów zachodzi bardzo szybko. Sprzyja mu dodatkowo zasadowe pH wody czy obecność barwników.

Cyjanotoksyny ulegają również biokumulacji. Omawiane związki wykryto w organizmach zooplanktonowych i bentosowych, a także mięśniach i organach ryb. Najwyższe stężenia notowane są w małżach oraz rybach przebywających w zakwicie i żerujących na planktonie, a także rybach bytujących blisko dna zbiornika. Sinice lub zooplankton zawierający toksyny mogą stanowić pożywienie dla organizmów planktonożernych, dzięki czemu niektóre toksyny mogą być przenoszone na wyższe poziomy troficzne (biomagnifikacja). Brak jednak publikacji, które wskazywałyby jednoznacznie na możliwość biomagnifikacji cyjanotoksyn. Część trwałych cyjanotoksyn na drodze sedymentacji dociera do dna zbiornika. Tam mogą ulegać sorpcji na cząsteczkach oraz biodegradacji. Intensywność procesu sorpcji zależy od uziarnienia i składu chemicznego osadów. Najwięcej toksyn jest wiązanych w materiale mulistym. Biodegradacja zachodząca w osadach uważana jest za najefektywniejszy proces samooczyszczania się zbiornika wodnego z cyjanotoksyn.

W najnowszej rekomendacji dotyczącej jakości wody pitnej, Światowa Organizacja Zdrowia podaje wartość maksymalną dopuszczalnego stężenie mikrocytyny-LR (zawartej w komórkach i rozpuszczonej w wodzie). Wynosi ono 1 µg/L (WHO, 2017).

Agencja Ochrony Środowiska w USA w swoich rekomendacjach publikuje inne wartości. Dopuszczalne stężenia mikrocytyn i cylindrospermopsyny w wodzie pitnej przeznaczonej

dla małych dzieci wynoszą odpowiednio: 0,3 µg/L i 0,7 µg/L. Wyższe stężenia dopuszczalne są w wodzie przeznaczonej do spożycia przez dzieci w wieku szkolnym i dorosłych.

Proponowana literatura

1. Bianchi T.S., Engelhaupt E., westman P., Andrén T., Rolff C., Elmgren R., 2000, *Cyanobacterial blooms in the Baltic Sea: natural or human-induced?*, Limnol. Oceanogr., 45(3), 716-726.
2. Błaszczyk A., Toruńska A., Kobos J., Browarczyk-Matusiak G., Mazur-Marzec H., 2010. *Ekologia toksycznych sinic*. Kosmos 59 (1-2):173-198.
3. Mazur-Marzec H., 2011. *Toksyczne zakwity sinic w Morzu Bałtyckim i ich wpływ na zdrowie ludzkie*. Raport WWF Polska; <http://awsassets.wwfpl.panda.org/downloads/raportsinicewwf.pdf>
4. Mazur-Marzec H., Pliński M., 2009. *Do toxic cyanobacteria blooms pose a threat to the Baltic ecosystem?* Oceanologia 51(3):293-319
5. Kawecka B., Eloranta P.V., 1994, *Zarys ekologii glonów wód słodkich i środowisk lądowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 1-252.
6. Kobos J., Błaszczyk A., Hohlfeld N., Toruńska-Sitarz A., Krakowiak A., Hebel A., Sutryk K., Grabowska M., Toporowska M., Messyasz B., Rybak A., Napiórkowska-Krzebietke A., Nawrocka L., Pełechata A., Budzyńska A., Zagajewski P., Mazur-Marzec H., 2013, *Cyanobacteria and cyanotoxins in Polish freshwater bodies*. Ocean.Hydrobiol. Stud. 42(4): 358-378
7. <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/254637/1/9789241549950-eng.pdf?ua=1>
8. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/additional-information-about-cyanotoxins-drinking-water>