

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

PEDAGOGICKÁ FAKULTA



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Karolína Tichá

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

PEDAGOGICKÁ FAKULTA

Katedra biologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Karolína Tichá

**Řasy a sinice jako producenti toxických látek a jejich vliv na
zdraví živočichů a člověka**

Olomouc 2020

Mgr. Eva Jahodářová, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně jen s použitím uvedených zdrojů a literatury pod vedením Mgr. Evy Jahodářové, Ph.D.

Bakalářská práce byla vypracována v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o autorském právu, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

Dále prohlašuji, že tištěná a elektronická verze jsou shodné.“

V Olomouci dne 9. 7. 2020

Karolína Tichá

.....

Poděkování

Na tomto místě děkuji Mgr. Evě Jahodářové, Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, vstřícný přístup, poskytování rad a materiálových podkladů k práci. Také děkuji Mgr. Markétě Dokonalové za cenné rady a podporu. V neposlední řadě děkuji své rodině za to, že mi byla oporou.

Obsah

1	Úvod	7
2	Obecná charakteristika sinic (Cyanobacteria)	8
2.1	Buněčná stavba sinic	8
2.1.1	Fotosyntetický aparát	9
2.2	Specializované buňky sinic	10
2.2.1	Heterocyty	10
2.2.2	Akinety	10
2.2.3	Aerotopy	11
2.3	Rozmnožování	11
2.4	Zásobní látky	11
2.5	Postavení v systému	12
2.6	Charakteristika jednotlivých řádů	12
2.7	Výskyt	14
3	Obecná charakteristika řas (Algae)	15
3.1	Stavba buňky řas	15
3.2	Postavení řas v systému dle Adl a kol. (2012)	17
3.3	Výskyt	18
4	Eutrofizace vod	19
4.1	Eutrofizace ve světovém měřítku	19
5	Vodní květ a vegetační zákal	20
6	Toxikologie	23
6.1	Toxicita	23
6.2	Vybrané případy otrav	24
7	Cyanoxiny	26
7.1	Dělení toxinů podle jejich původu	26
7.2	Dělení toxinů podle druhu otravy, kterou způsobují	26

8	Přehled zajímavých druhů toxinů	28
8.1	Hepatotoxiny	28
8.1.1	Microcystin	28
8.1.2	Cylindrospermopsin	29
8.1.3	Nodularin	30
8.2	Dermatotoxiny	30
8.2.1	Lyngbyatoxin	31
8.2.2	Aplysiatoxin a debromoaplysiatoxin	32
8.3	Toxiny typu Amnestic shellfish poisons (ASP)	33
8.3.1	Kyselina domoová	33
8.4	Toxiny typu Neurotoxic shellfish poisons (NSP)	34
8.4.1	Brevetoxiny	34
8.4.2	Ciguateratoxin	35
8.4.3	Anatoxin-a	36
8.5	Toxiny typu Paralytic shellfish poisons (PSP)	37
8.5.1	Saxitoxin	37
9	Závěr	39
10	Terminologický slovník	41
11	Seznam použitých zkratk	42
12	Seznam použitých zdrojů	43
12.1	Literární	43
12.2	Internetové	46
12.3	Zdroje obrázků	47
12.4	Zdroje tabulek	49

1 Úvod

Ačkoli laická veřejnost dnes na sinice nahlíží zejména jako na organismy, které člověku škodí, mají v ekosystému své nezastupitelné místo. Právě sinicím totiž vděčíme za vznik kyslíkové atmosféry. Nejen na počátku vzniku Země, ale i v současné době je jejich role v biocenóze nezastupitelná. Spolu s řasami se podílejí na fotosyntéze, při níž jako vedlejší produkt vzniká kyslík. Jako primární producenti jsou potravou pro zooplankton i pro některé pokročilejší herbivorní živočichy. Dotváří ekosystémy sladkých i slaných vod i ekosystémy terestrické, zkrátka jak napsal Hoek a kol. (1995) „*Řasy jsou všudypřítomné.*“

Jejich využití je velmi široké, od gastronomických odvětví přes farmacii, medicínu až po textilní či stavební průmysl. Dokonce podle Beckera (2005) existují i druhy mořských řas (*Cystoseira barbata*, *Fucus gardnerii*, *Phyllophora nervosa*), které jsou schopné snižovat hladinu cholesterolu v krvi. Pro další využití sinic je dnes velmi perspektivním odvětvím biotechnologie, jak zmiňuje Šejnohová s Maršálkem (2005), zejména kvůli vysokému podílu proteinů v sušině – 60 až 70 %. Zelené řasy mají podíl bílkovin v sušině značně menší, pro srovnání známá *Chlorella* – 12 až 28 %.

Řasy a sinice rovněž produkují řadu látek, z nichž některé jsou pro nás stále velkou neznámou. Díky zkoumání chemické podstaty těchto látek vzniklo několik nových vědeckých oborů jako například mořská farmakologie či mořská toxikologie (Hrdina a kol. 2014). Toxikologické poznatky využijí ve své práci a zaměřím se na škodlivé látky produkované skupinou řas a sinic.

V první části práce se zaměřím na charakteristiku skupin sinic a řas, zvláštnosti jejich buněčné stavby a zařazení v systému. Následně přejdu k procesu eutrofizace a definici vodního květu a vegetačního zákalu. Kapitolou o toxikologii se přesunu ke druhé části práce a samotným toxinům sinic a řas. Uvedu některé jejich příklady, popíši jejich chemickou stavbu, kdo je jejich producentem a jakými účinky se projevují na organismu živočichů či člověka.

Cílem mé bakalářské práce je:

popsat obecnou charakteristiku skupin sinic a řas, dále vytvořit přehled toxických látek sinic a řas, s důrazem na sinice. Toxické látky či celé skupiny toxinů budou popsány z hlediska jejich chemické struktury. Popíši u nich také to, jak na lidský, případně živočišný organismus působí.

2 Obecná charakteristika sinic (Cyanobacteria)

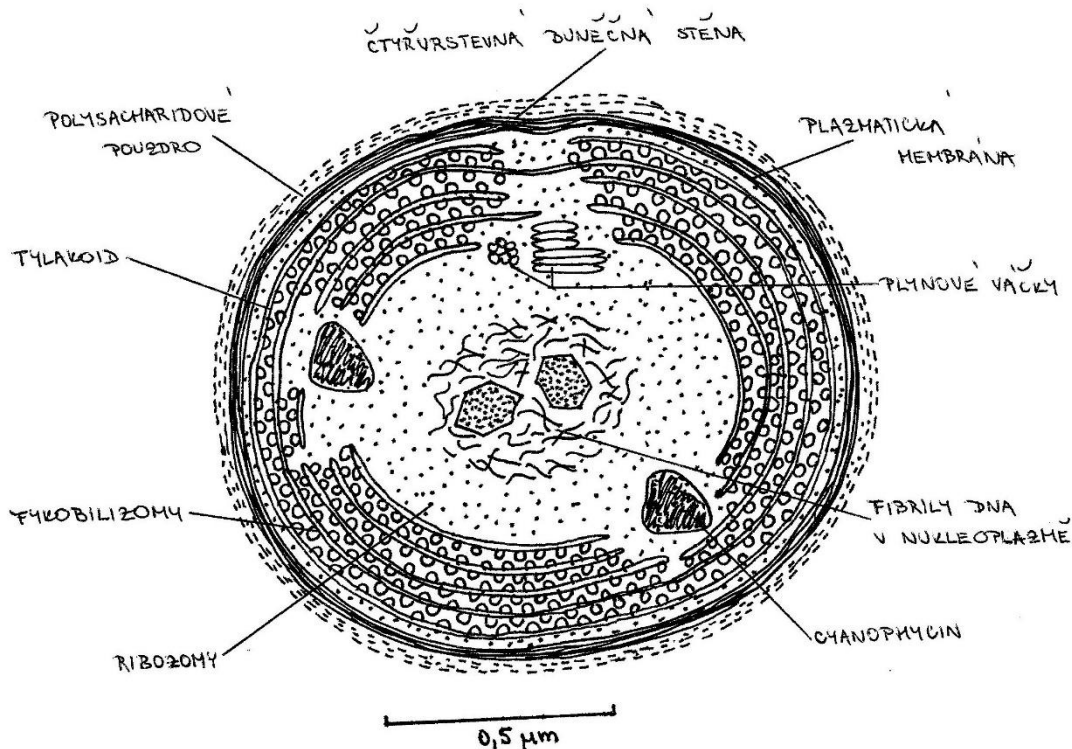
Oddělení Sinice (Cyanobacteria) je skupina autotrofních prokaryotních organismů řadících se do říše Bacteria. Podle Komárka (1978) jsou sinice po grampozitivních bakteriích nejjednodušší autotrofní organismy. Jsou to drobné organismy s jednoduchým tělesným uspořádáním, přesto však mohou tvořit okem nápadné makroskopické kolonie.

Jejich tělo tvoří stélka. Stélka může být kokální nebo vláknitá (trichální) (Kalina 1994, Pouličková & Jurčák 2001, Pouličková a kol. 2015). Laický pozorovatel nahlíží na sinice spíše jako na škodlivé organismy, protože negativní dopad vodního květu na kvalitu vody v nádržích je díky médiím všeobecně známým problémem. Přesto sinice patří i mezi organismy pro člověka užitečné, už jen kvůli tomu, že jim vděčíme za rozvoj kyslíkové atmosféry, a tím i za svůj život na Zemi.

2.1 Buněčná stavba sinic

Kalina (1994) uvádí, že velikost prokaryotických buněk se pohybuje mezi 1-10 μm . Jejich stavba je velmi jednoduchá. Prokaryotní buňka neobsahuje jádro v pravém slova smyslu, ale pouze jednu stočenou kruhovou molekulu DNA zvanou nukleoid. Dále postrádá semiautonomní buněčné organely (mitochondrie, plastidy), membránové organely a další struktury. Protoplast není diferencovaný. I přes absenci plastidů obsahuje buňka sinic tylakoidy. Protoplast buňky je ohraničen pevnou buněčnou stěnou utvořenou z mureinu, a kyseliny diaminopimelové (Novák & Skalický 2017, Kalina 1994, Komárek 1978).

Stavbu sinicové buňky kokálního tvaru popisuje Obrázek 1.



Obrázek 1: Buňka modrozelené kokální sinice. (převzato dle Hoek a kol. 2002)

2.1.1 Fotosyntetický aparát

Buňky sinic obsahují jako hlavní fotosyntetické pigmenty chlorofyly *a*, *b*, *c*, *d* a přídatná barviva fykobiliny (fykocyanin, fykoerytrin a allofykocyanin), beta-karoten a xanthofyly. Z nich jsou nejdůležitější zeaxanthin, echinone, cantxanthin, myxoxanthin a oscillaxantin. (Hoek a kol. 2002) Přičemž chlorofyl *a* je přítomen vždy. Ostatní typy chlorofylu se vyskytují následovně: *a+b*, *a+c*, *a+d* (Kalina & Váňa 2010). Přítomnost daných barviv a jejich vzájemné kombinace určují výslednou barvu sinice (Pouličková a kol. 2015, Pouličková & Jurčák 2001).

Fotosyntetická barviva se nacházejí v tylakoidech, jež představují hlavní složku fotosyntetického aparátu. Tylakoidy najdeme přímo v cytoplazmě, neboť jak již bylo zmíněno výše, sinice absentují plastidy. Tylakoidy mají podobu plochých měchýřků, uvnitř kterých se nachází komplexy proteinů fotosystému I a II. V těchto systémech dochází k přeměně světelné energie na chemickou. Ve druhém zmíněném komplexu probíhá štěpení vody, při němž se uvolňuje kyslík. Na povrchu fotosyntetické membrány tylakoidu se nachází fykobilizomy fungující jako „sběrače“ světla (Kalina & Váňa 2010).

2.2 Specializované buňky sinic

2.2.1 Heterocyty

Heterocyty jsou specializované buňky, díky nimž je sinice schopná fixovat vzdušný dusík. Při nedostatku dusíku v okolním prostředí se tyto buňky utvářejí z běžných vegetativních buněk. Většinou mají kulatý tvar a jejich vnitřní obsah je bezbarvý. Fixování dusíku je podle Šejnohové & Maršálka (2005) poměrně neobyčejnou záležitostí, jsou jí schopné pouze sinice a některé taxony bakterií. Heterocyty můžeme najít například u rodu *Anabaena* a *Nostoc*. Tyto buňky mají výrazně ztlustělou buněčnou stěnu a chybí v nich fotosystém II, který produkuje kyslík. Sinice nesou heterocyty na svých vláknech po celou dobu vegetačního období na rozdíl od spor, jež vznikají až v závěru vegetačního období (Komárek 1978, Pouličková a kol. 2015).

2.2.2 Akinety

Díky akinetám je sinice schopná přežít nepříznivé období. Jedná se o specializované buňky, jež se opět vytváří z buněk vegetativních (z jedné nebo více) při celkovém nedostatku základních živin. V protoplasmě se hromadí granula zásobních látek, a pakliže se nepříznivé životní podmínky nelepší, akineta se odtrhne od mateřského vlákna. V době obnovení příznivých podmínek a přísunu živin je akineta schopná vyklíčit a založit tak nové vlákno sinice (Šejnohová & Maršálek 2005).



Obrázek 2: Sinice rodu *Anabaena* se zaznačeným heterocytem (H) a akinetou (A).
(Šejnohová & Maršálek 2005, upraveno)

2.2.3 Aerotopy

Aerotopy jsou struktury vyplněné vzduchem, které sinici nadnáší a udržují ji tak ve vodním sloupci (Pouličková a kol. 2015, Šejnohová & Maršálek 2005).



Obrázek 3: Aerotopa planktonní sinice *Dolichospermum* (Pouličková a kol. 2015, upraveno).

2.3 Rozmnožování

Sinice se rozmnožují pouze nepohlavně – příčným dělením, pomocí exospor, baeocytů nebo hormogonií. Příčné dělení začíná vrůstáním dělicí přehrádky směrem od buněčné stěny do nitra buňky, přičemž nejprve dovnitř vrůstá pouze plazmatická membrána a později i další vrstvy kromě slizového obalu. Příčné dělení může dát za vznik dvěma dceřiným buňkám nebo jich může vznikat vícero díky vícenásobnému příčnému dělení, kdy jsou na sebe dělicí roviny vzájemně kolmé (př. *Merismopedia* sp.). Baeocyty vznikají po několikanásobném dělení mateřské buňky, jsou to malé buňky kokálního tvaru, jež se uvolňují teprve po úplném rozpuštění mateřské buněčné stěny. Exospory jsou podobné baeocytům, ale tvoří se na volných koncích mateřského vlákna a před dělením nasedají na podklad. Na rozdíl od baeocytů se uvolňují po protržení koncové části buněčné stěny. Hormogonia jsou úlomky vláken, které se oddělují od vlákna mateřského a postupně z nich opět doroste nové vlákno. (Kalina & Váňa 2010, Komárek 1978)

2.4 Zásobní látky

Hlavní zásobní látkou sinic je sinicový škrob, svým složením se podobá glykogenu. V buňkách sinic tvoří drobné granulky, které se dají pozorovat pod světelným mikroskopem. Dalšími zásobními látkami jsou cyanofycinová zrna a granule polyfosfátu voluntinu. Cyanofycinová zrna tvoří zásobárnu dusíku. K nahromadění voluntinu dochází, jestliže

je v životním prostředí sinice přebytek fosforečnanů. Z těchto zásob sinice čerpá naopak v době jejich nouze (Kalina & Váňa 2010, Komárek 1978).

2.5 Postavení v systému

V následující tabulce je zobrazena současná klasifikace sinic.

Tabulka 1: Systém sinic dle Komárek a kol. (2014).

Impérium: Prokarya (Prokaryota)
Říše: Bacteria
Oddělení: Cyanobacteria (Cyanophyta)
Řád: Gloeobacterales
Řád: Chroococcales
Řád: Chroococcidiopsidales
Řád: Nostocales
Řád: Oscillatoriales
Řád: Pleurocapsales
Řád: Spirulinales
Řád: Synechococcales

2.6 Charakteristika jednotlivých řádů

Řády Gloeobacterales, Chroococcales, Chroococcidiopsidales, Oscillatoriales a Synechococcales zahrnují sinice s kokální stélkou. Jednoduché vláknité stélky mají některé druhy sdružené pod řád Oscillatoriales. Heterocytózní nepravě i pravě větvené stélky najdeme v řádu Nostocales (Komárek a kol. 2014).

Řád Gloeobacterales zastupují nepohyblivé sinice s buňkami žijícími jednotlivě nebo v nepravidelně složených skupinách, které jsou obaleny slizem. Rozmnožování probíhá příčným dělením buněk (Komárek & Hauer 2020).

Řád Chroococcales zahrnuje jednobuněčné sinice, které nabývají kokálního, elipsovitého či vejčitého tvaru. Rozmnožují se buď příčným dělením, pomocí exocytů nebo pomocí baeocytů (Kalina & Váňa 2010). Stélka má poměrně jednouchou morfologii. Druhy řádu Chroococcales se běžně vyskytují jak ve vodním, tak i v terestrickém prostředí (Dvořák a kol 2017).

Některé druhy řazené dnes v řádu Chroococcales jako například *Prochloron didemni*, *Prochlorontrix hollandica* či *Prochloroccus marinus* byly dříve součástí oddělení Prochlorophyta (a jediné jeho třídy Prochlorophyceae). Důvodem byla odlišná skladba fotosyntetických barviv v tylakoidech. Tyto druhy obsahují chlorofyl *a*, *b* a dále alfa-karoten a zeaxanthin (Kalina 1994). Molekulární studie však potvrdily jejich zařazení do oddělení Cyanobacteria (Kalina & Váňa 2010).

Jednotlivé buňky řádu Chroococciopsidales mohou existovat samostatně nebo ve shlucích obalené v tenkém slizovém pouzdře. V cytoplazmě buněk se nachází nepravidelně rozmístěné thylakoidy. Zajímavostí je, že rod *Chroococciopsis* si NASA zvolila do projektu „Terraforming od Mars“ jako potencionálního kolonizátora Marsu. Očekává se, že by mohl zapříčinit vznik kyslíkaté atmosféry (Komárek a kol. 2014).

V monofyletickém řádu Nostocales najdeme modrozelené sinice s vláknitou stélkou. Stélka může být nerozvětvená, s nepravým i s pravým větvením. Tyto druhy mají specializované buňky heterocyty a akinety a rozmnožují se prostřednictvím hormogonií. Spadají zde známé čeledi jako Gloeotrichiaceae, Aphanizomenonaceae či Nostocaceae (Hoek a kol. 2002, Komárek a kol. 2014).

Dalším řádem je Oscillatoriales, ten zahrnuje převážně jednoduché vláknité typy stélek s výjimkou rodu *Cyanothece*, jehož buňky oválného tvaru obalené v tenkém slizovém pouzdře žijí většinou samostatně, příkladem jsou druhy *Cyanothece major* a *Cyanothece aeruginosa* (www.sinicearasy.cz 2020).

Oscillatoriales se opět rozmnožují pomocí hormogonií, nemají akinety ani heterocyty. Mezi nejznámější rody patří například *Oscillatoria*, *Lyngbya*, *Planktothrix* nebo *Phormidium*, všechny mají válcovité volné trichomy podobné stavby (Hoek a kol. 2002).

Řád Pleurocapsales sdružuje rody unicelulární nebo tvořící kolonie několika buněk. Rozmnožování probíhá binárním dělením buňky a tvorbou endospor. Patří zde rod *Cyanocystis*, u něhož známe asi 25 druhů vyskytujících se převážně na mořském pobřeží, a *Pleurocapsa*, jejíž druhy je možné najít na kamenech v čistých vodních tocích hor nebo v mořích (Hoek a kol. 2002).

Řád Spirulinales patří mezi vláknité sinice s pravidelně spirálovitě stočenými trichomy bez pochvy. Rody této skupiny postrádají heterocyty a akinety (Komárek a kol. 2014). Druhy

patřící do tohoto řádu bývají poměrně pohyblivé. Rozmnožují se rozpadem trichomů nebo pomocí hormogonií (Dvořák a kol. 2017).

Samotný druh *Spirulina* je hojně využíván v odvětví biotechnologie. Je známá jako výživový doplněk pro člověka i zvířata (Dvořák a kol. 2017).

Posledním řádem je Synechococcales, což je rozsáhlý řád zahrnující přes sedmdesát rodů jednobuněčných nebo vláknitých sinic. Fylogeneze taxonu není monofyletická a pravděpodobně díky dalším studiím bude vypadat odlišně. (Komárek a kol 2014). Do tohoto řádu patří například *Merismopedia*, jejíž uspořádání kolonií připomíná tabulku čokolády. Nebo *Synechococcus*, *Leptolyngbya* atd.

2.7 Výskyt

Sinice mohou žít jednotlivě, častěji však tvoří vlákna nebo kolonie, jež při přemnožení způsobují makroskopické zelené povlaky (Pouličková & Jurčák 2001, Kalina 1994).

Jsou to kosmopolitní organismy schopné přežít v extrémních podmínkách. Najdeme je jak ve sladkých vodách, tak i v mořích, ve vřídlech termálních pramenů, v jeskynních, na kamenech v Antarktidě, na vlhkých skalách, dokonce žijí i v srsti živočichů a způsobují tak její zbarvení do modra či zelena. To můžeme pozorovat například u lenochoda dvouprstého nebo medvěda ledního (Znachor 2005).

Sinice velmi často vstupují do symbiotických vztahů. V podobně lišejníků vytváří trvalé symbiotické soužití s houbami (Znachor 2005). Za obecně prospěšný vztah je však považována i endosymbióza = proces vcestování sinice do nitra nefotosyntetizujícího eukaryotického organismu. Čímž vznikla eukaryotická buňka se schopností fototrofní výživy (Kalina & Váňa 2010, Oborník 2009).

Ve vodních nádržích představují sinice důležitou složku biocenózy. Časné druhy jako *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Microcystis* se podílí na produkci biomasy (Komárek 1978), která může být potravou pro vířníky a filtrující zooplankton. Zdá se, že zooplankton požívající sinice by mohl být řešením vodních květů, ale není tomu tak. Jakmile se totiž sinice rozmnoží a mnohonásobně zvětší, zooplankton je již není schopen pro jejich rozměry požírat (Znachor 2005).

3 Obecná charakteristika řas (Algae)

Řasy, odborně Algae, tvoří jeden monofyletický taxon, ale velmi rozsáhlou heterogenní skupinou navzájem si podobných organismů, které jsou podle nejnovějšího členění eukaryot dle Adla a kol. (2012) rozptýlené v sedmi skupinách eukaryotních organismů: Archaeplastida, Stramenopiles, Alveolata, Rhizaria, Excavata, Haptophyta a Cryptophyta.

Tělo řas je, stejně jako u sinic, reprezentováno stélkou. Řasy však mají pokročilejší typ buňky – buňku eukaryotickou. Výživa probíhá zejména fotoautotrofně.

3.1 Stavba buňky řas

Eukaryotická buňka řas na rozdíl od sinic obsahuje jádro v pravém slova smyslu zvané nucleus. Pravé jádro je obaleno karyotékou, v níž se nacházejí póry umožňující látkovou výměnu mezi jádrem a cytoplazmou buňky. Jádro vyplňuje nukleoplazma tvořená chromatinem. Chromatin je směsí DNA a proteinů. Uvnitř každého jádra eukaryotické buňky se nachází jadérko (mohou být i dvě) – nucleolus, obalené vlastní membránou. Nucleolus plní řídicí funkci při syntéze RNA (Navrátilová & Navrátil 2017).

Na povrchu eukaryotické buňky se nachází plazmatická membrána z dvojité vrstvy fosfolipidů. Tato membrána je semipermeabilní a zajišťuje tok látek dovnitř a vně buňky. Eukaryotní buňka rostlinná má navíc oproti buňce živočišné pevnou buněčnou stěnu, jež funguje jako mechanická ochrana a opora buňky, podílí se na transportu látek a na buněčném dělení. (Kalina & Váňa 2010, Novák & Skalický 2017)

Vnitřní prostor buňky je kompartmentován na specializované organely, zbytek prostoru kolem organel vyplňuje tekutý cytosol. Cytosol je bezbarvá tekutina obsahující z 70 až 80 % vodu, dále proteiny a další nízkomolekulární látky. Je to látka biochemicky i fyziologicky aktivní – probíhá v něm neustálé cytoplazmatické proudění (Navrátilová & Navrátil 2017).

Důležitou součástí eukaryotických buněk jsou semiautotrofní organely. Jak již název napovídá, tyto organely mají vlastní nukleové kyseliny, ribozomy a dvojitou membránu na svém povrchu. Vznik semiautotrofních organel popisuje endosymbiotická teorie, kterou poprvé vyslovil ruský biolog Konstantin Merežkovskij roku 1905. Avšak tehdy nebyla jeho teorie přijata, vzkřísila ji až Lynn Margulisová roku 1967 (Oborník 2009). Mezi tyto organely s vlastní „samosprávou“ patří mitochondrie, energetické centrum buňky, a plastidy.

Chloroplasty jsou zodpovědné za průběh fotosyntézy díky obsahu fotosyntetických barviv (chlorofyly, karoteny, xantofyly, fykoerytriny a fykocyaniny). Ta se nachází uložená

v tylakoidech, což jsou zploštělé čočkovité útvary, seskupené plochou stranou k sobě a tím tvořící tzv. grana. Vnitřní prostor chloroplastů je vyplněn tekutinou zvanou stroma (Kalina & Váňa 2010, Novák & Skalický 2017).

Další semiautotrofní strukturou je již zmíněná mitochondrie, opět má na svém povrchu dvojitou membránu stejně jako plastidy. Vnitřní membrána se vchlipuje dovnitř a tvoří výběžky nepravidelného tvaru nazývané kristy. Vnitřní prostor podobně jako u plastidů nebo u jádra opět vyplňuje tekutá hmota, tentokrát je to mitochondriální matrix s vysokým obsahem proteinů, enzymů a nukleových kyselin (Novák & Skalický 2017).

Rostlinné buňky mají na rozdíl od těch živočišných vakuolu, která funguje jako skladiště primárních metabolitů buňky jako jsou cukry, pigmenty a enzymy, sekundárních metabolitů (odpadních látek), proteinů či důležitých iontů jako je například Ca^{2+} . Vakuola navíc pomáhá udržet neutrální pH cytosolu buňky (Navrátilová & Navrátil 2017).

Ribozomy jsou organely o dvou subjednotkách zajišťující proteosyntézu, vyskytují se volně v cytoplazmě nebo přichycené k endoplazmatickému retikulu (drsné ER) (Novák & Skalický 2017).

Endoplazmatické retikulum je spolu s Golgiho aparátem membránová organela složená z měchýřků plochého tvaru. Rozlišujeme drsné (s přítomností ribozomů) a hladké endoplazmatické retikulum (bez přisedlých ribozomů). Hlavní funkce, kterou ER zprostředkovává, je komunikace jádra a sousedních buněk. Rovněž transportuje lipidy a proteiny do Golgiho komplexu. Golgiho aparát pak navazuje na ER a podílí se na transportu tuků a bílkovin z ER (Navrátilová & Navrátil 2017).

Cytoskelet tvoří oporu buňky prostřednictvím tělísek mikrotubulů a mikrofilament, účastní se buněčného dělení, růstu buňky a pohybu cytoplazmy a organel (Novák & Skalický 2017).

3.2 Postavení řas v systému dle Adl a kol. (2012)

Podle Pouličkové a kol. (2015) jsou nejzásadnějšími liniemi ve vývoji řas Archaeplastida a SAR. V linii Archaeplastida jsou sdružení primární endosymbionti – Glaukophyta, zelené řasy a ruduchy. Skupina SAR zase sdružuje vývojovou větev hnědých řas (Stramenopiles) s obrněnkami a skupinou Chlorarachniophyta. Haptophyta a Cryptophyta (skrytěnky) nemají stále zcela ujasněné postavení a zůstávají samostatně nezařazeny.

Tabulka 2: Zjednodušený systém řas. Červeně zvýrazněné taxony produkují toxiny. (Adl a kol 2012, Pouličková a kol. 2015)

Doména: Eukaryota
Archeplastida
Glaukophyta
Rhodophyta (ruduchy)
zelené řasy (Chlorophyta + Streptophyta)
Excavata
Euglenophyta (krásnoočka)
SAR
Rhizaria
Chlorarachniophyta
Stramenopiles
Eustigmatophyceae
Chrysophyceae (zlativky)
Bacillariophyceae (rozsivky)
Rhaphidophyceae (chloromonády)
Phaeophyceae (chaluhy)
Xanthophyceae (různobrvky)
Alveolata
Dinophyta (obrněnky)
Haptophyta
Cryptophyta (skrytěnky)

3.3 Výskyt

Řasy kolonizují stanoviště všeho druhu obdobně jako sinice – od terestrických, přes všechny typy vodních stanovišť, dokonce i prostředí aerické (Hindák 1978). Kamkoli se podíváme, vždy tam nějaký druh řasy můžeme najít. Výjimku nepředstavují ani prostředí s extrémními životními podmínkami. Skupina zelených řas se vyskytuje v mořích i poblíž břehů v nádržích se sladkou vodou, na vlhkých podkladech terestrických stanovišť, kamenech, skalách či na kůře stromů (př. rod *Trentepohlia*) (Pouličková a kol. 2015). Před vyschnutím je chrání vrstva slizu, kterou vylučují, ocitnou-li se na suchu (Čížková a kol. 2004).

Chaluhy patří naopak mezi výhradně mořské druhy, díky makroskopickým stélkám je řadíme mezi největší druhy řas. Nejčastěji se vyskytují v litorálu a sublitorálu (Čížková a kol. 2004).

Mořské ruduchy vyhledávají stanoviště s teplejší vodou (Čížková a kol. 2004). Sladkovodní druhy nacházíme v rašeliništích nebo ve vodních tocích vysoko v horách, kde indikují čistotu vody. V naší přírodě se můžeme setkat s ruduchami rodů *Hildebrandia*, *Audouinella*, *Batrachospermum*, *Lemanea* (Pouličková a kol. 2015).

4 Eutrofizace vod

Eutrofizace, podle Kočího a kol. (2002) doslova „zamoření živinami“, je proces, při němž dochází ke změně nutričních poměrů v daném vodním tělese. Zvyšuje se hlavně koncentrace anorganických živin jako je dusík (N), fosfor (P), a to buď přirozeně nebo uměle. Přirozeně tento proces nastává například ve chvíli, kdy se oceánská voda bohatá na živiny dostává do vody povrchové. Není však důležité jen zvýšení nebo snížení množství dusíku a fosforu, ale i vzájemné poměry mezi prvky, př. poměr dusík-fosfor, dusík-křemík, křemík-fosfor (Blackburn 2005).

Proces eutrofizace zahrnuje i eutrofizaci umělou. Její příčinou může být intenzivní zemědělská výroba spojená s hnojením, zvýšená produkce průmyslových, ale i komunálních odpadních vod a uvolňování polyfosforečnanů z použitých pracích a čistících prostředků (Kočí a kol. 2000).

4.1 Eutrofizace ve světovém měřítku

Je zřejmé, že eutrofizace není pouze lokální děj, ale v současné době spíše globální problém. Kočí a kol. (2000) uvádí, že nadměrná eutrofizace začala být běžnou již od poloviny minulého století díky velkoplošnému hnojení obdělávaných zemědělských ploch. Rovněž většina velkých evropských řek jako je Dunaj, Labe nebo Seina jsou „zamořeny živinami“. Z neevropských lokalit jsou známými eutrofizovanými jezery například wisconsinské jezero Mendota, texaské jezero Travis nebo velká jezera ležící na hranicích USA a Kanady. Nadměrným množstvím živin trpí korálové útesy v Karibském moři i v oblasti kolem Austrálie. Rovněž pobřeží Číny a Japonska vykazuje známky vysoké eutrofizace (Harper 1992).

Co se týče opatření proti eutrofizaci, nabízí se odstraňování nadměrného množství fosforu z odpadních vod. Toto odstraňování je nutné, ale těžko proveditelné, jsou jej schopné pouze velké ČOV. Nejúčinnějším způsobem se ukazují preventivní opatření čili zabraňování znečišťování toků i stojatých vod látkami, jež podporují nárůst vegetace řas a sinic. (Kočí a kol. 2000).

5 Vodní květ a vegetační zákal

Vodní květ je jako nevídaný přírodní úkaz znám již od Starověku, zmínka o zkažení vody v řece Nil a její změně barvy na rudou se vyskytuje i v Bibli. Nejspíše se jednalo o sinici *Planktothrix rubescens*. Tento úkaz můžeme najít ve stojatých vodách, zejména v teplých letních měsících, kdy v těchto vodách dochází k přemnožení planktonních sinic (Znachor 2005). Podle Hoeka a kol. (1995) se úkaz červeně zbarvené vody objevuje také v devatenáctém století v eutrofizovaných jezerech švýcarských Alp. Jako příčinu tohoto zbarvení uvádí červenou sinici *Oscillatoria rubens*.

Pojem vegetační zákal se na rozdíl od vodního květu týká přemnožení řas, v anglicky psané literatuře se však oba jevy označují jako „water bloom“ (Říhová 2007).

Rozvoj obou jevů souvisí s procesem eutrofizace vody. Díky velkému přísunu anorganických fosfátů, zdrojů uhlíku a dusíku pak převažuje tvorba biomasy nad dělením buněk řas a sinic (Skulberg 2005). Eutrofizace tak představuje problém ze všech možných úhlů pohledu, nejen pro letní rekreanty. Obecně snižuje technické využití nádrží, v nichž došlo k jeho rozvoji. Pro rybáře a vodohospodáře se stává problematickým zejména tehdy, kdy dojde k jeho rychlému zániku. Ve vodě začnou probíhat rozkladné hnilobné procesy a vodním organismům se pak nedostává kyslík (Kalina 1994). Rozklad vodního květu je navíc často doprovázen nepříjemným zápachem (WHO 2003a).

Největší dopad na ekosystémy mají však vodní květy druhů produkujících toxiny. Jejich vliv se zapře do celého potravního řetězce a může mít dopad i na konzumenty vyšších řádů jako je člověk. Podle Blackburnové (2005) se takto jedovaté vodní květy označují souhrnně HABs z anglického *Harmful algal blooms*. Blackburnová (2005) dále uvádí, že nejčastější producenti toxinů pochází z čeledí Dinophyceae, Bacillariophyceae, Raphidophyceae, Prymesioophyceae a oddělení Cyanobacteria. Rozmanité skupiny produkují rozmanité druhy toxických látek, které v následujících částech práce více přiblížím. V Tabulce 3 je soupis možných dopadů na zdraví člověka i dalších živých organismů a druhy sinic a řas, které tyto účinky zapříčiňují podle Zingonové & Enevoldseny (2000).

Tabulka 3: Příklady toxických druhů sinic a řas a konkrétní problémy, které způsobují
(Zingonové & Enevoldsen 2000).

Účinek působení toxického organismu	Zařazení do taxonu	Konkrétní příklady škodlivých druhů organismů
1. na zdraví člověka		
Paralytická otrava měkkýši (PSP)	Dinophyta	<i>Alexandrium</i> spp., <i>Pyrodinium bahamense</i> var. <i>compressum</i> , <i>Gymnodium catenatum</i>
Průjmová otrava měkkýši (DSP)	Cyanobacteria Dinoflagellata	<i>Anabaena circinalis</i> <i>Dinophysis</i> spp., <i>Prorocentrum</i> spp.
Neurotoxická otrava měkkýši (NSP)	Dinoflagellata	<i>Gymnodini breve</i>
Amnesická otrava měkkýši (ASP)	Bacillariophyceae	<i>Pseudo-nitzschia</i> spp., <i>Nitzschia navis-varingica</i>
Otrava azaspiracidy měkkýšů (AZP)	Neznámý původce	Neznámý původce
Otrava rybami Ciguatera (CFP)	Dinoflagellata	<i>Gambierus toxicus</i>
Dýchací potíže, podráždění kůže, neurologické účinky	Dinoflagellata	<i>Gymnodini breve</i> , <i>Pfiesteria piscicida</i>
Hepatotoxicita	Cyanobacteria	<i>Nodularia spumigena</i> , <i>Lyngbya</i> spp., <i>Microcystis aeruginosa</i>
2. na rekreaci a turismus		
Produkce pěny, slizu a nepříjemného zápachu	Dinoflagellata Haptophyta Bacillariophyceae Cyanobacteria	<i>Noctilica scintillans</i> , <i>Prorocentrum</i> spp. <i>Phaeocystis</i> spp. <i>Cylindrotheca closterium</i> <i>Nodularia spumigena</i> , <i>Aphanizomenon flos-aqua</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Lyngbya</i> spp.

3. na ekosystém Hypoxie, anoxie	Dinoflagellata Bacillariophyceae Haptophyta	<i>Noctiluca scintillans</i> , <i>Heterocapsa triquetra</i> <i>Skeletonema constantum</i> <i>Phaeocystis</i> spp.
Toxicita pro faunu	Cyanobacteria Cyanobacteria	<i>Nodularia spumigena</i> <i>Aphanizomenon flos-aquae</i> , <i>Anabaena circinalis</i>

Aktuální informace o stavu vodních nádrží v ČR a o kvalitě jejich vody je možné sledovat na webové stránce <https://www.koupacivody.cz/>, kterou spravuje Český ústav zeměměřičský a katastrální. Měření jakosti vody v nádržích mají na starosti krajské hygienické stanice. Další všeobecné informace ke koupání v přírodě poskytuje portál Ministerstva zdravotnictví České republiky, dostupný na odkazu:

https://www.mzcr.cz/verejne/obsah/koupani-v-prirode_1071_5.html.

6 Toxikologie

Krmenčík & Kysilka (2007) definují toxikologii jako vědní disciplínu, která se zabývá působením nežádoucích látek (jedů) nejen na živé organismy, ale i na celé ekosystémy. Toxikologie se zaměřuje na chemickou povahu xenobiotik, dále na mechanismus, jakým na organismy účinkují, a to z hlediska buněčného, molekulárního a biochemického. Rovněž studuje výskyt těchto látek.

Patočka (2005) dodává, že toxikologie patří mezi obory interdisciplinární, neboť pro své výzkumy využívá poznatky z biologie, chemie, biochemie, mikrobiologie, fyziologie, farmakologie, medicíny, zoologie, botaniky, ekologie a dalších přírodních věd.

6.1 Toxicita

Toxicita je ústřední pojem z oblasti toxikologie a znamená schopnost chemických látek mít neblahý vliv na živé organismy. Tyto nepříznivé účinky definujeme jako toxické (Patočka 2005). Rozlišujeme toxicitu akutní a chronickou.

Rozdíl mezi akutní a chronickou toxicitou určuje délka působení jedu a jeho podané množství. Akutní toxicita je silná reakce organismu, vzniká po jednorázovém podání velké dávky toxické látky. Účinky se dostaví buď ihned či v řádu několika hodin. Zatímco toxicita chronická se začne projevovat teprve po dlouhodobém působení jedu, který byl přijímán po menších dávkách. (Linhart 2014, Patočka 2004)

Dávka je množství látky podávané najednou. V následující tabulce je dělení toxických látek podle střední smrtelné hodnoty LD₅₀. Hodnota LD₅₀ udává množství dávky jedu, která způsobí smrt 50 % testovaných jedinců do 24 hodin od podání látky. LD ve zkratce tedy znamená „letální dávka“ a udává se v mg/kg (CCOHS¹ 2020).

Tabulka 4: Klasifikace toxických látek podle hodnoty LD₅₀ u člověka při perorálním podání (Patočka 2005, CCOHS 2020)

Míra toxicity	Dávka	Množství dávky přepočítané pro jednu osobu o hmotnosti 70 kg
Super toxická	Méně než 5 mg / kg	1 zrno (méně než 7 kapek)
Extrémně toxická	5-50 mg / kg	4 ml (7 kapek až 1 lžička)
Vysoce toxická	50-500 mg / kg	30 ml (více než 1 polévková lžíce)

¹ CCOHS = Canadian Centre for Occupational Health and Safety

Středně toxická	0,5 - 5 g / kg	30-600 ml
Mírně toxická	5-15 g / kg	600-1200 ml
Prakticky netoxická	Nad 15 g / kg	více než 1200 ml

Škodlivou chemickou látku s nepříznivými účinky na organismy označujeme jako toxin. Toxiny se dělí podle různých kritérií: podle míry toxicity, původu toxické látky (přírozené a syntetické), přírozené dále dělíme na toxiny živočišného původu, rostlinného atd. Živočišné zase může dělit na jedy hmyzí, hadí aj. (Patočka 2005).

6.2 Vybrané případy otrav

Z historie známe několik případů hromadných otrav lidí i zvířat, k nimž došlo díky požití kontaminované vody nebo mořských plodů jako jsou slávky jedlé a další druhy mořských měkkýšů živících se planktonními sinicemi a řasami (WHO 2003a, Codd a kol. 2005). V následujících řádcích zmíním několik velkých otrav. Přehledově jich více můžete vidět v Tabulce 5, v níž jsou rozděleny na otravy prostřednictvím přímé konzumace kontaminované vody a na otravy vnějším kontaktem kontaminovanou vodou.

Nejstarší zmínka o rozsáhlé otravě s příznaky gastroenteritidy pochází z roku 1931, kdy se lidé nakazili z kontaminované vody řeky Ohio. (Codd a kol. 2005a, Chorus & Bartram 1999).

Griffiths & Saker (2003) se zmiňují o první velké otravě cylindrospermopsinem v roce 1979, která je také známá jako Palm Islandská záhadná otrava. Palm Island je ostrov poblíž Austrálie. V listopadu roku 1979 bylo 148 lidí z domorodých aboridžinských kmenů hospitalizováno, neboť jevílo příznaky gastroenteritidy. Ve více než sto případech byli postiženími otravou děti. Ve své době byla otrava spojována s různými příčinami jako byla nezralá manga. Až o několik let později se prokázalo, že příčinou otravy byl výskyt vodního květu v pitné vodě. Chemicky byla ve vodě zjištěna sloučenina cylindrospermopsin, nebezpečný hepatotoxin, který je sekundárním metabolitem sinice *Cilindrospermopsis raciborsii*.

Jeden z pozdějších případů otravy pochází z let 2002 až 2004, kdy docházelo k intoxikaci osob na Floridě, v New Jersey a Virginii prostřednictvím mořských ryb. Jednalo se o 28 případů otravy neurotoxinem saxitoxin, který vyvolává podobné účinky jako neurotoxin tetrodotoxin – zejména gastrointestinální poruchy a problémy s dýcháním (Landsberg a kol. 2006).

Tabulka 5: Známé případy otrav toxiny sinic (Chorus & Bartram 1999, Codd a kol. 2005a, Codd a kol. 2005b).

Rok	Místo (zdroj)	Cyanobacteria	Toxin	Účinky toxinu
Požítí kontaminované vody				
1931	USA, řeka Ohio	<i>Microcystis</i>	-	gastroenteritida, bolesti břicha, zvracení
1979	Austrálie, Palm Island	<i>Cylindrospermopsis</i>	Cylindrospermopsin	gastroenteritida, poškození jater, ledvin a střev
1981	Austrálie, Armidale	<i>Microcystis</i>	Microcystin	poškození jater
1977-1976	Čína	<i>Microcystis</i>	Microcystin	kolorektální karcinom, úmrtí
1972-1990	Čína	<i>Microcystis</i>	Microcystin	primární rakovina jater, úmrtí
1994	Švédsko, Malmö	<i>Planktothrix</i>	Microcystin	gastroenteritida, horečky, bolesti břicha a svalů
Kontakt s vodou prostřednictvím kůže				
1989	VB, Anglie, Statfordshire	<i>Microcystis</i>	Microcystin	gastroenteritida, bolest v hrudi, puchýře v ústech, zvracení, bolest břicha, horečka, plicní konsolidace, průjem
1996	Spojené království	<i>Planktothrix</i>	Microcystin	vyrážky, horečka
2002-2003	Finsko	<i>Anabaena lemmermannii</i>	Saxitoxin	horečka, podráždění očí, bolesti břicha, vyrážky

7 Cyanoxiny

Toxické látky ze skupin řas i sinic bývají souhrnně nazývány jako cyanotoxiny. Jsou to sekundární metabolity sinic a řas. Jedná se o velmi rozmanitou skupinu chemických sloučenin, které podle své struktury spadají do skupin peptidů, alkaloidů, lipidových sloučenin a cyanobakteriálních lipopolysacharidů (Bláha a kol. 2009). Můžeme je dělit podle několika kritérií (Kristensen & Khan 2020). Základní dělení je podle Maršálka (2004) na cytotoxiny, dermatotoxiny, hepatotoxiny, iritanti toxiny, neurotoxiny a embryotoxiny.

Cytotoxiny poškozují buňky, je to například cylindrospermopsin. Dermatotoxiny dráždí kůži a jsou příčinou dermatid – aplysiatoxin a lyngbyatoxin. Další skupinou jsou hepatotoxiny způsobující poškození jater, řadíme zde například mikrocystin a nodularin. Iritanti toxiny zapříčiňují alergie a jiné dráždivé účinky, patří mezi ně lipopolysacharidy. Poslední zmíněné jsou neurotoxiny, jejichž působení negativně ovlivňuje a poškozují nervovou soustavu člověka. Známé neurotoxiny řas jsou anatoxiny a saxitoxiny (Maršálek 2004).

7.1 Dělení toxinů podle jejich původu

Podle původu dělíme toxické látky na biogenní a syntetické. Biogenní toxiny jsou všechny sloučeniny, které si řasa syntetizuje sama nebo vzniknou rozkladem jejích metabolických produktů. Patří mezi ně nukleové kyseliny RNA a DNA, jejichž složkou je purin, který lze považovat za toxický. Každá buňka řasy obsahuje 4 až 6 % nukleové kyseliny v sušině. Toto množství u člověka způsobí zvýšení koncentrace kyseliny močové v krevní plazmě, protože lidský organismus je schopen rozkládat purin na kyselinu močovou. Zvýšená hladina této kyseliny může být příčinou rozvoje dny či vzniku ledvinových kamenů a nefropatie. Aby se tato rizika snížila, příjem stanovené doporučené denní dávky nukleových kyselin pro člověka jsou maximálně 4 gramy za den (Becker 2005).

Syntetické toxické látky se skládají z jedovatých sloučenin, které nalezneme v životním prostředí řasy či sinice (Becker 2005).

7.2 Dělení toxinů podle druhu otravy, kterou způsobují

Kalina a Váňa (2010) rozlišují dvě skupiny cyanotoxinů podle jejich „síly“ působení. První skupinu představují toxiny způsobující smrtelné otravy (neurotoxiny, anatoxiny a hepatotoxiny). Toxiny zapříčiňující smrtelné otravy jsou produkovány sinicemi *Microcystis*, *Anabaena-flos-aquae*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Planktothrix rubescens* a *Trichodesmium*.

Do druhé skupiny jsou řazeny cytotoxiny, které jsou méně jedovaté a zapříčiňují lehčí otravy a jejichž působení není letální. Přesto mohou být následky působení trvalé. Někdy se však tyto látky využívají ve farmacii jako cytotoxická antibiotika, která působí proti nádorovému bujení (Kalina & Váňa 2010, Skulberg 2005, Borowitzka 1999).

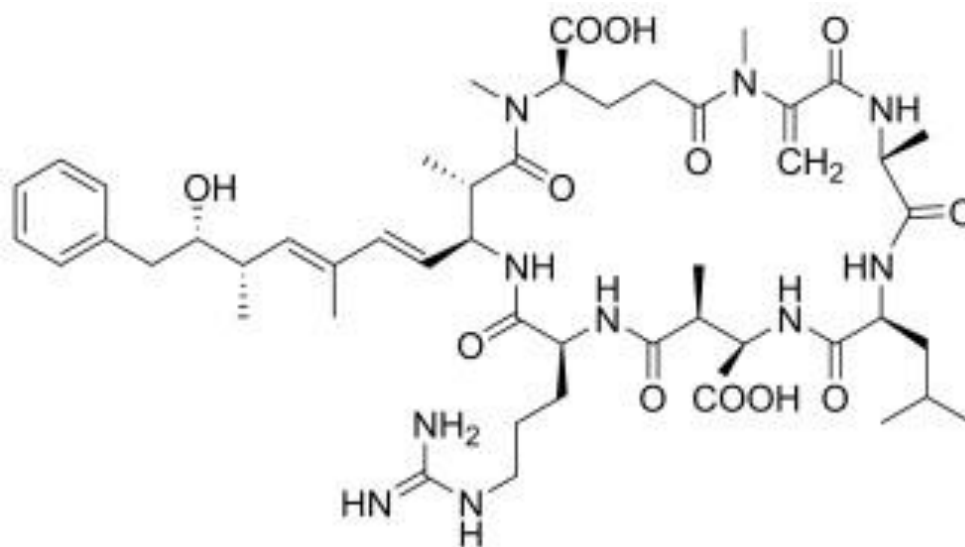
8 Přehled zajímavých druhů toxinů

8.1 Hepatotoxiny

8.1.1 Microcystin

Microcystin je jeden z nejčastěji se vyskytujících hepatotoxinů (Bláha a kol. 2009), se kterým se můžeme setkat i v České republice. Podle Codd a kol. (2005a, 2005b) se jedná o monocyklický heptapeptid, který ireverzibilně inhibuje proteinové fosfatázy 1 a 2A, narušuje integritu buněčných membrán a jejich vodivost a způsobuje nádorové bujení. Microcystin je látkou akutně, ale i chronicky toxickou (Bláha a kol. 2009), hodnota akutní toxicity LD₅₀ se uvádí 25 až 1000, což znamená, že podle (CCOHS 2020) řadíme microcystin mezi extrémně toxické látky.

Po vážném poškození jater nastává hemodynamický šok, selhání myokardu a smrt organismu. Microcystin, jehož strukturní vzorec je zobrazen na Obrázku 4, má rovněž na svědomí oxidační poškození DNA (Bláha a kol. 2009).



Obrázek 4: Strukturní vzorec microcystinu (van der Merwe 2015)

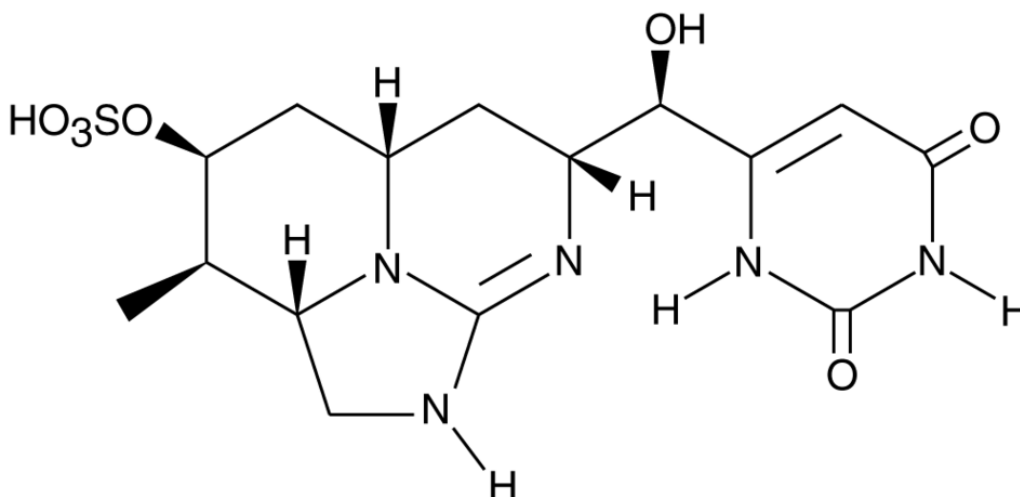
Toxických rodů sinic vylučujících microcystin je hned několik: *Microcystis*, *Anabaena*, *Noctoc*, *Anabaenopsis*, *Hapalosiphon* (Codd a kol. 2005a, Codd a kol. 2005b). Z rodu *Microcystis* jsou za většinu případů intoxikace nodularinem zodpovědné druhy *M. aeruginosa*, *M. viridis* a *M. wesenbergii* (Solter & Beasley 2013).

8.1.2 Cylindrospermopsin

Cylindrospermopsin je guanidinový alkaloid, který způsobuje metabolické poruchy zahrnující v první řadě nekrotické poškození jater, dále ledvin, sleziny, brzlíku, plic a střev. Inhibuje proteosyntézu a jeho účinky jsou rovněž genotoxické, neboť se váže na DNA (Solter a Beasley 2013, Bláha a kol. 2009). Chemická struktura tohoto tricyklického alkaloidu je zobrazena na Obrázku 5. Mezi původce cylindrospermopsinu řadíme *Cylindrospermopsis*, *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Raphidiopsis* a *Umezakia*. Akutní hodnota toxicity se uvádí $LD_{50} = 200$ až 2100 (Codd a kol. 2005a, Codd a kol. 2005b), čímž jej řadíme k vysoce toxickým látkám.

Ke cylindrospermopsinu bych chtěla zmínit i druh *Cylindrospermopsis radiborskii*, což je toxický teplomilný invazní druh sinice v našich vodách. Kromě našich vod se vyskytuje i v tropickém a subtropickém pásu. Společně s druhem *Raphidiopsis* patří mezi sladkovodní planktonní sinice, které produkují silné cyanotoxiny – cylindrospermopsin a saxitoxin (Aquilera a kol. 2018)

Projevy intoxikace jsou podle Solter a Beasley (2013) dehydratace, krvavý průjem, letargie, šok, zvracení, podráždění kůže. Člověk se může nakazit pitím vody z kontaminovaného vodního zdroje, ale i požitím exponovaných zvířat.

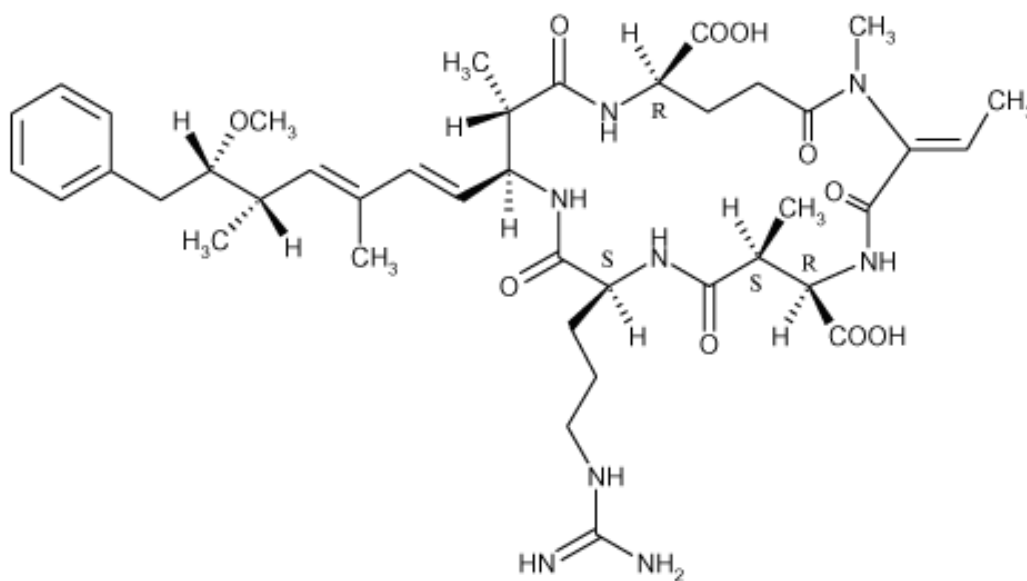


Obrázek 5: Strukturální vzorec cylindrospermopsinu. (Cayman chemical 2020)

8.1.3 Nodularin

Historicky první popsanou sinicí, která způsobila úhyn zvířat, byla *Nodularia spumigena*, od níž odvozujeme název hepatotoxinu nodularinu (WHO 2003a). Jedná se o cyklický pentapeptid (Obrázek 6), který inhibuje serin-threoninové proteinové fosfatázy (Codd a kol. 2005a, Codd a kol. 2005b, WHO 2003a). Stejně jako mikrocystin zapříčiňuje narušení vodivosti a integrity membrán. Je silným karcinogenem (Codd a kol. 2005a, Codd a kol. 2005b). Způsobuje masivní krvácení v játrech savců a závažné narušení struktury jater. Kromě jater působí i na ledviny (WHO 2003a).

Intoxikace se projevuje nejen u savců, ale i u ptáků v souvislosti s požitím mořských mlžů. Cílem toxinů jsou játra. Mezi nejvýznamnější klinické příznaky intoxikace patří bolesti břicha, zvracení, průjem, bolesti očí a hlavy, tachykardie. K úmrtí dochází do 24 hodin po podání látky (Solter & Beasley 2013).



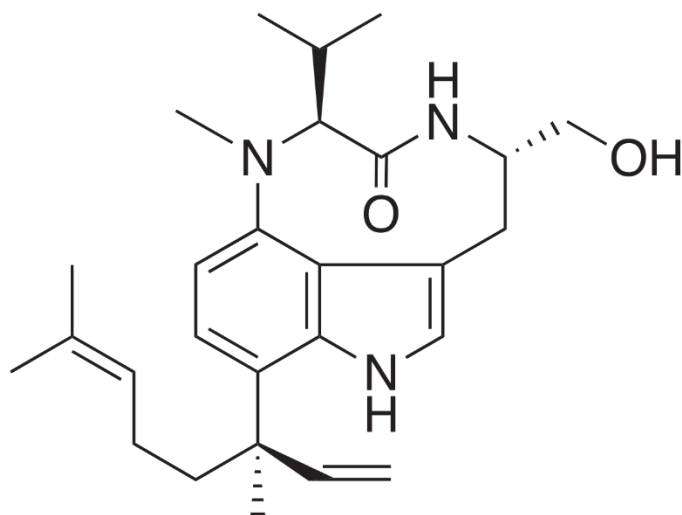
Obrázek 6: Strukturální vzorec Nodularinu (Žegura a kol. 2011)

8.2 Dermatotoxiny

Při kontaktu toxinu s pokožkou dochází k rozvoji dermatitidy, z níž se může rozvinou akutní zánět kůže. Příznaky jsou svědění a pálení, které započne během několika minut plavání v oblastech, kde jsou suspendovány fragmenty sinic či až několika hodinách. Mezi známé původce dermatitid patří mořské sinice *Lyngbya majuscula*, *Oscillatoria nigroviridis*, *Schizothrix calcicola* (WHO 2003a).

8.2.1 Lyngbyatoxin

Lyngbyatoxin (Obrázek 7) je alkaloid mimo jiné se zánětlivými a karcinogenními účinky. Svým působením aktivuje proteinkinázy C (Rundhaug & Fisher 2010, Bláha a kol. 2009, Tidgewell a kol 2010).



Obrázek 7: Strukturní vzorec lyngbyatoxinu (PNGWING 2020)

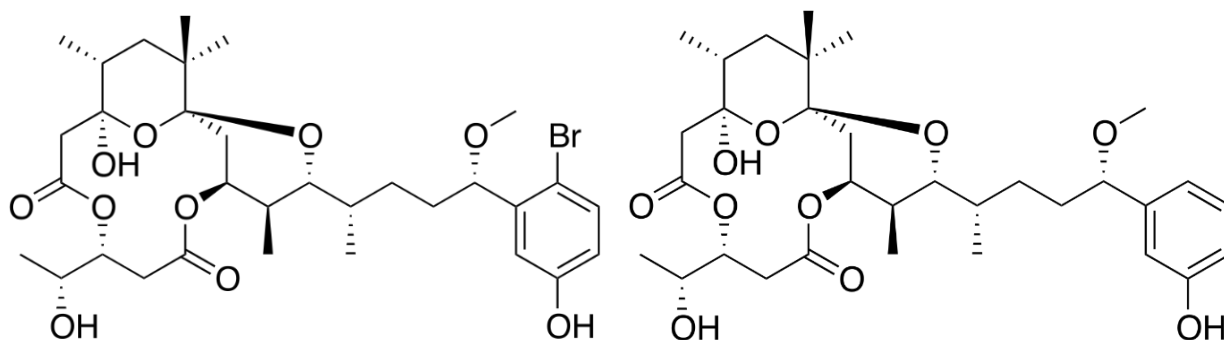
Podle Bláhy a kol. (2009) patří mezi hlavní producenty lyngbyatoxinu sinice rodu *Lyngbya*, *Schizotrix* a *Oscillatoria*. Tidgewell a kol. (2010) dodává, že lyngbyatoxin byl poprvé izolován z druhu *L. majuscula*, což je sinice s nevětvenou stélkou, která je poměrně hojně rozšířená, zejména v pobřežních zónách teplých tropických a subtropických moří. Krom toho, že je *L. majuscula* producentem lyngbiatoxinu, produkuje i celou řadu dalších toxinů jako jsou aplysiatoxiny a debromoaplysiatoxiny (Solter & Beasley 2013).

Tento toxin způsobuje akutní dermatitidy, podráždění očí a dýchacích cest. Přímá konzumace toxinu může mít letální následky (Tidgewell a kol. 2010, Solter & Beasley 2013). Dalšími příznaky orálního požití jsou gastrointestinální potíže, vředy v dutině ústní a v jícnu, bolesti hlavy, závratě, tachykardie a horečka (Solter & Beasley 2013). Smrtné otravy lidí byly spojovány s konzumací kontaminovaného želvího masa (Tidgewell a kol. 2010, Solter & Beasley 2013).

Účinky lyngbyatoxinu se mohou projevit například i u psů, kteří se koupou se vodě, kde se nachází vodní květ s obsahem této látky. Zvířata jsou sice relativně odolná vůči dermatidě, ale konkrétně u psů se nákaza může projevit gastrointestinálními potížemi podobně jako u člověka (Dalefield 2017).

8.2.2 Aplysiatoxin a debromoaplysiatoxin

Laboratorní syntéza látek aplysiatoxin a debromoaplysiatoxin byla poprvé uskutečněna v roce 1987, přičemž obě látky přitahovaly pozornost farmakologů za účelem studia jejich karcinogenity. (Tidgelwell a kol. 2010). Chemické vzorce obou příbuzných toxinů vidíme na Obrázku 8.



Obrázek 8: Strukturní vzorce aplysiatoxinu (vlevo) a debromoaplysiatoxinu (vpravo).
(Rastogi 2015)

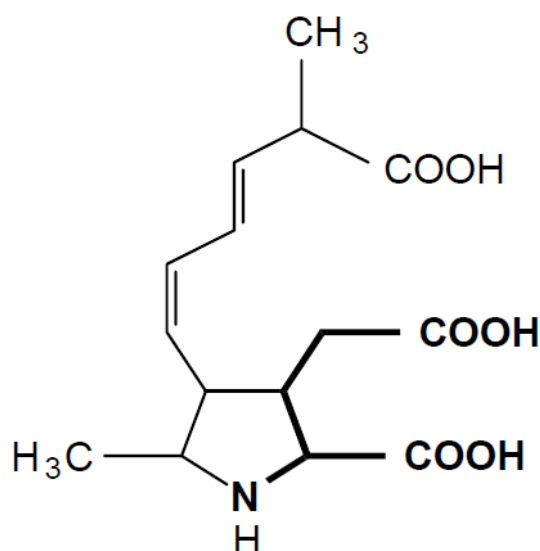
Aplysiatoxin byl poprvé izolován ze střeva mořského plže *Stylocheilus longicauda* jako sekundární metabolit sinice *Lyngbya majuscula*, která tvořila převážnou část jídelníčku zmíněného plže (Tidgelwell a kol. 2010, Nagai a kol. 2019). Později byl aplysiatoxin izolován i z dalších sinic, konkrétně z *Schizothrix calcicola*, *Oscillatoria nigro-viridis* a *Trichodesmium erythraeum* (Nagai a kol. 2019). Později byly hlášeny intoxikace po požití červené řasy *Gracilaria coronopifolia*, z níž byl opět izolován aplysiatoxin a jemu podobné sloučeniny (Nagai a kol. 2019).

Co se týče debromoaplysiatoxinu, ten byl objeven u druhů *Oscillatoria nigroviridis* a *Schizothrix calcicola*. Je vysoce zánětlivý a podporuje nádorové bujení (WHO 2003a, Rundhaug & Fisher 2010). Oba toxiny způsobují zejména dermatitidy, jejich účinky jsou obecně velmi podobné jako u lyngbyatoxinu (Nagai a kol. 2019, Tidgelwell a kol. 2010).

8.3 Toxiny typu Amnestic shellfish poisons (ASP)

8.3.1 Kyselina domoová

Toxin typu ASP je podle Hrdiny a kol. (2008) i kyselina domoová, kterou řadíme mezi neurotoxické excitotoxiny, díky signifikantnímu vlivu na paměť. Co se týče chemické podstaty, jedná se o trikarboxylovou kyselinu (Hrdina a kol. 2005), jejíž strukturní vzorec vidíme na Obrázku 9.



Obrázek 9: Strukturní vzorec kyseliny domoové (Hrdina a kol. 2005).

Producentem kyseliny domoové jsou planktonní rozsivky rodu *Pseudo-nitzschia* (Hrdina a kol. (2005) uvádí, že konkrétně se jedná o druhy *P. multiseriis*, *P. pseudodelicatissima*, a *P. australis*) a některé ruduchy. Rozsivky jsou potravou mořských mlžů, krabů, a z ryb například ančoviček a sardinek, díky nimž došlo k řadě intoxikací lidí. Známá jsou i hromadná úmrtí lachtanů, delfinů či pelikánů, kteří se živili kontaminovanými rybami (Solter & Beasley 2013).

Působením kyseliny domoové se otevírají sodné, draselné a vápenaté iontové kanály, a tím dochází k poškození osmotické tkáně. Vápník se hromadí v buňkách, aktivuje fosfolipázy, endonukleázy a proteázy, které následně poškozují mitochondrie, DNA, cytoskelet i buněčné membrány. Výsledkem je tedy nekróza neuronů nebo apoptóza (Solter & Bealey 2013).

Intoxikace byly prokázány v oblastech Nový Zéland, Irsko, Mexiko či v Japonsku (Hrdina a kol. 2005). Roku 1987 došlo k rozsáhlé otravě více než 250 obyvatel kanadského Zálivu svatého Vavřince, kteří v restauraci požili kontaminované slávky jedlé (*Mytilus edulis*)

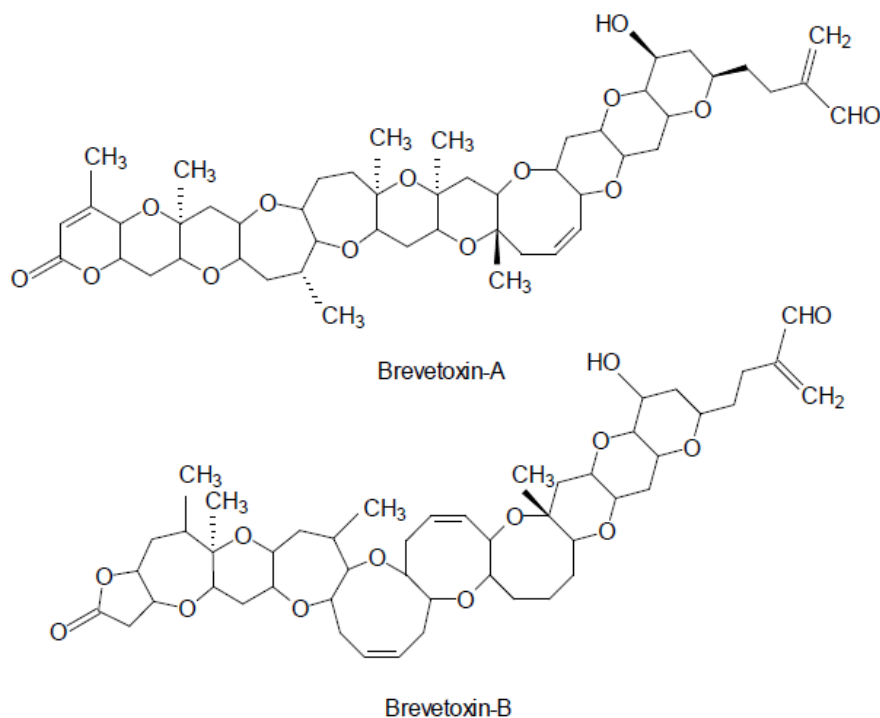
(Hrdina a kol. 2005). Mezi nejčastější příznaky u nakažených lidí patří nauzea, zvracení, průjem a křeče v žaludku. Méně časté příznaky jsou kolísání krevního tlaku, bolesti hlavy, dezorientace a kóma (Hrdina a kol. 2005, Solter & Beasley 2013). U 25 % případů dochází podle Solter & Beasley (2013) ke krátkodobým ztrátám paměti. Experimenty dokonce prokázaly, že poškození mozku, k němuž působením kyseliny domoové dochází, jsou ireverzibilní (Hrdina a kol. 2005).

8.4 Toxiny typu Neurotoxic shellfish poisons (NSP)

NSP toxiny zahrnují brevetoxiny, ciguatomoxiny, saxitoxiny a extrémně jedovatý tetrodotoxin (Hrdina a kol. 2008). Je to skupina toxinů charakteristická svými účinky na nervovou soustavu (Christensen & Khan 2020).

8.4.1 Brevetoxiny

Brevetoxiny jsou opět látky hromadící se v masu mořských ryb a měkkýšů, proto jsou potenciálně nebezpečné pro člověka po požití nakaženého masa (Hrdina a kol. 2008). Řadí se mezi cyklické polyethery a je jich známo deset typu A a B. Na Obrázku 10 je zobrazen jejich strukturní vzorec. Můžeme vidět, že tyto látky obsahují 11 (v případě typu A) nebo 10 kyslíkatých heterocyklů (v případě typu B). Ani typ A ani B neobsahuje žádný atom dusíku.



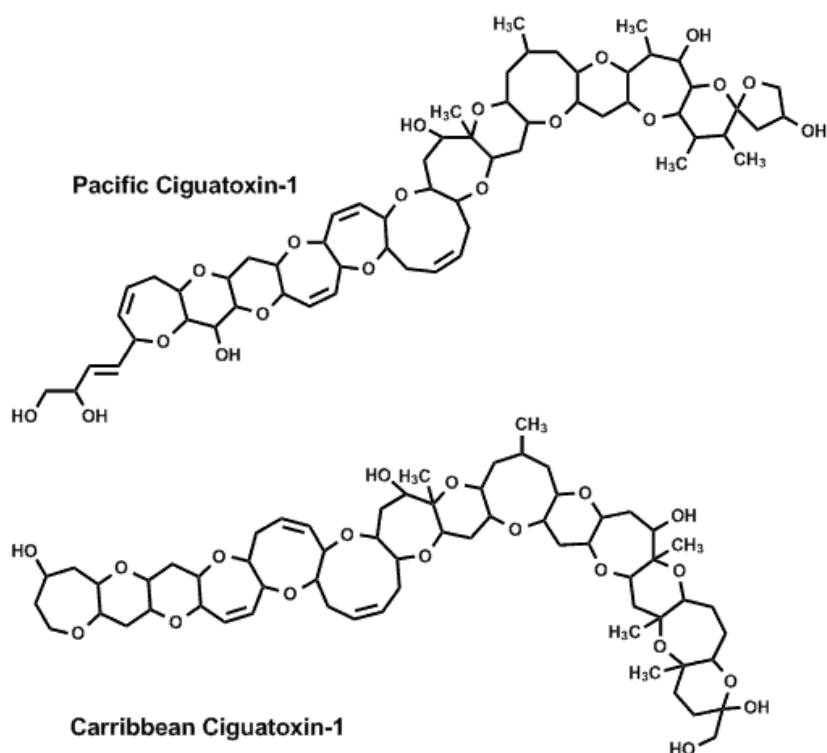
Obrázek 10: Strukturní vzorec brevetoxinu A a B (Hrdina a kol. 2008).

Brevetoxiny působí v organismu syndrom neurotické otravy měkkýši. Organismus se může nakazit pouhou inhalací kontaminované vody. Otrava se projevuje respirační paralýzou, hemolýzou, gastroinvestinálními potížemi, dezorientací a celkovou otupělostí. Vlivem brevetoxinů dochází také k potlačování buněčné imunity a proliferaci lymfocytů, což vede k tomu, že postižený je více náchylný k infekčním chorobám (Solter & Beasley).

Hrdina a kol. (2008) označuje jako producenty brevetoxinů mořské obrněnky (Dinophyta) *Karenia breve*, *Gymnodium breve* a *Psychodiscus brevis*.

8.4.2 Ciguateratoxin

Mirandová (2007) tvrdí, že ciguateratoxin bývá příčinou otrav člověka z kontaminovaného masa ryb v tropickém a subtropickém pásu. K otravám často dochází v oblasti Karibiku, ale i u pobřeží Austrálie a v Tichomoří. Nakažené bývají dravé ryby žijící u korálových útesů rodu barakuda a kanic. Látka je nejvíce koncentrována v játrech ryby.



Obrázek 11: Strukturní vzorec ciguateratoxinu. (U.S. Food & Drug Administration 2018)

Ciguateratoxin patří z chemického hlediska mezi složité polycyklické étery, Obrázek 11 zobrazuje jeho strukturní vzorec. Nejčastěji se vyskytuje v podobě ciguatoxinu-1 (Solter & Beasley 2013). Hodnota jeho toxicity je velmi vysoká a první příznaky otravy se objevují již tři až čtyři hodiny po jeho podání podle Mirandové (2007). Solter & Beasley (2013) však uvádí, že příznaky můžeme sledovat již 10 až 30 minut po požití. Mezi příznaky patří gastrointestinální

obtíže – nauzea, průjmy, zvracení a silné křeče. Toxin působí i na nervovou soustavu. Jeho působení se projevuje paralýzou svalů, znečitlivěním a brněním mimických svalů, potížemi s dechem. Často se objevují i kardiovaskulární potíže. Zajímavým účinkem ciguateratoxinu je opačné vnímání horka a chladu, kdy studené vnímáme při doteku jako horké a opačně (Mirandová 2007).

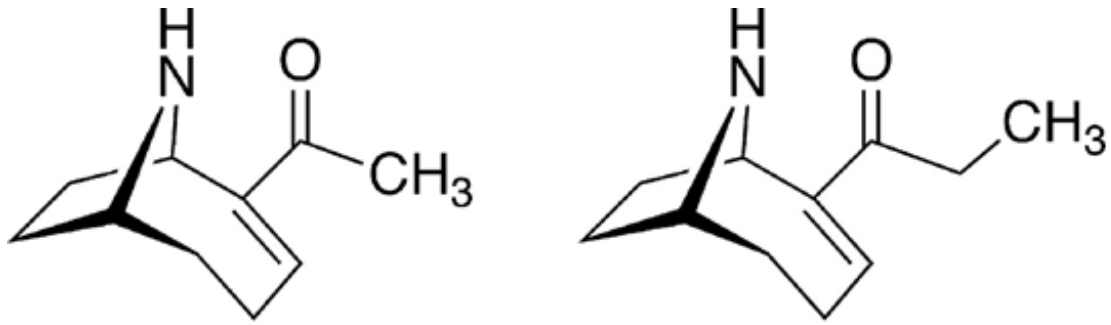
Ciguateratoxin je sekundárním metabolitem Dinophyta z rodů *Ostreopsis*, *Prorocentrum*, *Amphidinium* a *Coolia* a v Atlantiku byl objeven v nitru více než 400 druhů ryb, které při následní konzumaci nejeví žádné známky otravy, jejich chuť ani pach se nemění (Solter & Bealey 2013).

8.4.3 Anatoxin-a

Podle Kaliny (1994) a Hrdiny a kol. (2008) je za jeden z nejnebezpečnějších toxinů produkovaných zvláště čeledí obrněnek považován anatoxin. Ze sinic je jeho původcem poměrně rozšířený druh s příznačným druhovým názvem *Anabaena flos-aquae* (Kalina 1994).

Anatoxin-a a jemu podobný homoanatotoxin-a jsou látky napodobující acetylcholin. (Acetylcholin je neurotransmitter podobný dopaminu nebo adrenalinu.) Tyto látky se tak vážou na acetylcholin na receptorech neuronových synapsí v místě, kde dochází ke kontaktu nervové a svalové soustavy (tj. nervosvalová ploténka). Enzym acetylcholinesteráza (AChE) není schopná anatoxin odbourat, proto dochází k nadměrné stimulaci svalů vedoucí k únavě. Protože mezi nejvíce stimulované svaly patří svaly dýchací, častým důsledkem otravy anatoxinem bývá smrt na selhání dýchacích cest a mozková hypoxie. Dalšími příznaky otravy jsou inkontinence moči, slzení, křeče a dušnost. Účinek homoanatotoxinu je ještě vyšší kvůli uvolňování acetylcholinu do neuromuskulárních synapsí (Christensen & Khan 2020).

Zajímavostí je, že anatoxin byl popsán jako nejbližší příbuzná látka kokainu (Carmichael & Gorham 1978). Na Obrázku 12 je zobrazen strukturní vzorec anotoxinu-a a homoanotoxinu-a. Chemicky se jedná o alkaloid související s tropany, který působí jako neuromuskulární blokátor. Často se vyskytuje u rodů *Aphanizomenon*, *Anabaena*, *Raphidiopsis*, *Oscillatoria*, *Planktothrix* a *Cylindrospermum* (Codd a kol. 2005a, Codd a kol. 2005b)



Obrázek 12: Strukturní vzorec anatoxinu-a (vlevo) a homoanatoxinu-a (vpravo)
(American Society for Microbiology 2020)

Kalina (1994) dále uvádí, že anatoxin je složen z prudce jedovatého alkaloidu, který postihuje nervovou soustavu, a z polypeptidu, jenž způsobuje rozpad jaterních buněk, a z pteridinů.

8.5 Toxiny typu Paralytic shellfish poisons (PSP)

Jed Paralytic shell poison má několik hlavních složek, mezi které patří saxitoxin a gonyantoxiny. Působení saxitoxinu se podobá lokálním anestetikům, váže se na sodíkové kanály a blokuje je. Letální dávka při perorálním podání je podle Krmenčíka a Kysilky (2007) pro člověka asi 4 mg toxinu. Pro představu mohou být tyto 4 miligramy obsaženy v menší porci ústřic, než je 300 gramů (Krménčík & Kysilka 2007). K intoxikaci člověka dochází často prostřednictvím jedovatých měkkýšů, kteří absorbovali toxiny z fytoplanktonu typu PSP (Krménčík & Kysilka 2007, Hrdina a kol. 2008).

8.5.1 Saxitoxin

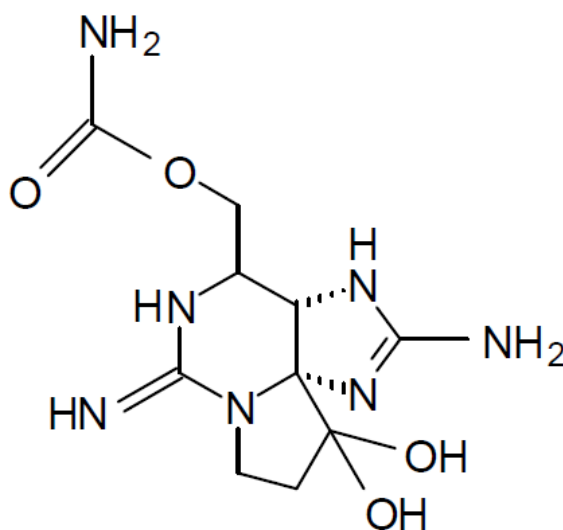
Skupina saxitoxinů zahrnuje více než 50 tricyklických guanidinových alkaloidů, které jsou si navzájem strukturně příbuzné (Solter & Beasley 2013).

Van der Merwe (2015) a Codd (2005a, 2005b) se shodují na tom, že saxitoxin produkují i sinice rodů *Aphanizomenon*, *Planktothrix*, *Cylindrospermopsis*, *Lyngbya* a *Scytonema*. Aquilera a kol. (2018) dodávají, že saxitoxin produkují i v našich vodách přítomné sinice rodů *Cylindrospermopsis* a *Raphidiopsis*, jak již bylo zmíněno výše.

Z obrněnek produkujících saxitoxin Hrdina a kol. (2008) zmiňuje druhy *Gonyaulax catenella*, *G. tamarensis*, *Gymnodium catenatum*, *G. breve*. Zingone a kol. (2005) doplňuje *Alexandrium andersonii* jako toxickou obrněnku produkující saxitoxin a Solter & Beasley (2013) dodávají druh *Pyrodinium*.

Saxitoxin je často přítomen zejména v útrobach aljašských mořských mušlí *Saxidomus gigantea* (česky chionka skalní), které se živí právě toxickými obrněnkami. Od rodového jména tohoto mlže byl odvozen název toxinu. (Schantz a kol. 1975, Hrdina a kol. 2008). Otravy lidí a obratlovců byly ale prokázány i po pozření krabů a ryb (Solter & Beasley 2013). Na Aljašce měl saxitoxin na svědomí úmrtí 67 % populace vydry mořské. V roce 2002 zase došlo na Floridě k hromadnému úmrtí delfínů, v jejichž potravě se nacházely ryby nakažené saxitoxinem. Ve stejném časovém období došlo i k otravám lidí v New Jersey a v New Yourku, přičemž tyto otravy z mořských ryb byly taktéž spojovány se saxitoxinem (Solter & Beasley 2013).

Letální dávka se uvádí pro dospělého člověka při perorálním užití 0,5 mg (Hrdina a kol. 2008), přičemž častou příčinou smrti bývá respirační selhání, ke kterému dochází během 2 až 12 hodin po požití (Solter & Beasley 2013). Příznaky otravy jsou gastrointestinální poruchy, bolesti hlavy, poruchy motorické koordinace, poruchy kognitivních funkcí (poruchy řeči), problémy s dechem (Hrdina a kol. 2008). Neexistuje žádný protijed. (Solter & Beasley 2013). Obrázek 13 ukazuje, že saxitoxin je složen ze tří dusíkatých cyklů a bývá označován jako 3,4,6 – trialkyltetrahydropurin (Schantz a kol. 1975). Jedná se o karbamátový alkaloid, který



Obrázek 13: Strukturní vzorec saxitoxinu (Hrdina a kol. 2008)

blokuje sodíkové kanály v myelizovaných i nemyelizovaných nervech (Codd a kol. 2005a, Codd a kol. 2005b), tím dochází k potlačení akčního potenciálu svalů myokardu a k inhibici přenosů vzruchů z axonů do kosterních svalů (Solter & Beasley 2013).

9 Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se zabývala významem řas a sinic z hlediska toxikologie. Větší důraz je v práci kladen na sinice, neboť otravy toxiny pocházejícími ze sinic byly v historii častější. Rovněž oddělení Cyanophyta zahrnuje více toxických zástupců než skupina řasy. Na začátku práce jsem nejprve charakterizovala skupinu sinic. Popsala jsem stavbu jejich prokaryotické buňky a zvláštnosti, kterými sinice vynikají. Poté jsem obdobným způsobem rozvedla skupinu řasy. U obou skupin jsem zmínila aktuální zařazení v systému. Následně jsem vysvětlila proces eutrofizace a úkazy zvané vodní květ a vegetační zákal. Prostřednictvím kapitoly o toxikologii jsem se přesunula k samotným toxinům řas a sinic. Vysvětlila jsem, podle jakých kritérií je možné toxiny rozdělovat. V hlavní části práce jsem zmínila několik zajímavých toxinů, jenž byly v minulosti častými původci intoxikací po celém světě. Zjistila jsem tak, že nejčastějším toxinem působícím otravy v našich zeměpisných šířkách je microcystin. Vystupuje jako sekundární metabolit sinic s častým výskytem jako je *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Planktothrix* či *Microcystis*, která svým jménem přímo odkazuje na název toxinu. Ze skupiny řas není známo tolik toxicky působících rodů jako z oddělení sinic, přesto nějaké jsou. Nejčastěji se jedná o obrněnky rodu *Gymnodium*.

Vezmu-li v potaz akutní míru toxicity jednotlivých látek, mnoho z nich je vysoce toxických a působí smrt několik hodin po požití. Příkladem může být již zmíněný hepatotoxin microcystin. Obecně mezi nejčastější příznaky všech intoxikací patří gastrointestinální potíže zahrnující nevolnost, zvracení, průjem, bolesti břicha a křeče. Jako nejkurióznější vnímám účinek ciguateratoxinu, který způsobuje opačné vnímání tepla a chladu. Zajímavostí také je, že toxické metabolity sinic a řas nepůsobí na všechny organismy stejně. Pro mořské ryby či plže jsou původci těchto látek běžnou potravou a toxiny se tudíž nejvíce hromadí v trávicím traktu, krvi ale přechází i do svalů. Díky tomu se jedy dostávají skrze kontaminované maso až k sekundárním konzumentům, kterými mohou být například v moři žijící obratlovci nebo člověk. V našich sladkovodních stojatých vodách se kromě microcystinu můžeme setkat mimo jiné s látkou zvanou cylindrospermopsin, vysoce jedovatým alkaloidem, který opět produkují běžně se vyskytující *Aphanizomenon*, *Anabaena* a zejména *Cylindrospermopsis*. Intoxikace toxiny sinic a řas nám tedy nejsou geograficky nijak vzdáleny.

Řasy a sinice jsou organismy pro život na Zemi nepostradatelné. Studium jejich toxinů je velmi důležité, protože nám může odhalit jak látky pro naše tělo nebezpečné,

tak i látky, které můžeme využít v potravinářství, biotechnologii, farmacii i v dalších odvětvích průmyslu.

10 Terminologický slovník

alimentární otrava	nákaza pocházející z potravin
anoxie	stav, kdy je v prostředí absence kyslíku
dystrofní vody	vody (jezera) chudé na živiny s vysokým množstvím huminových kyselin, nízkým pH, voda v nich má hnědou barvu, nízká diverzita
eutrofní vody	vody bohaté na živiny
cytopatopatický efekt	proces, při němž vlivem toxinu dochází k narušení procesů uvnitř buňky, ale buňka je stále životaschopná
cytostatický efekt	proces, při němž jsou zachovány základní buněčné funkce kromě funkce reprodukční
cytotoxicita	proces vedoucí k buněčné smrti
gastrointestinální (potíže)	týkající se trávicí soustavy
hemodynamický šok	kritický stav hypertenze, při němž dochází k selhání oběhu krve
hypertenze	zvýšený krevní tlak
hypotenze	nízký krevní tlak
hypoxie	snížené (nedostatečné) množství kyslíku ve tkáních
intraperitoneální podání léku	aplikace léku prostřednictvím injekce nebo infúze do břišní (peritoneální) dutiny
oligotrofní vody	vody chudé na živiny, geologicky mladá jezera (řadí se tam i plesa) s vysokým zastoupením flóry a fauny
parestézie	mravenčení
perorální podání léku	aplikace léku ústy
plicní tumor	plicní nádor
renální	ledvinový
tachykardie	zvýšená tepová frekvence
teratogenní	označení vnějšího faktoru, který může u plodu vyvolat vrozenou vývojovou vadu
xenobiotikum	látka pro organismus cizorodá

11 Seznam použitých zkratek

ASP	Amnestic shellfish poisoning (Amnesická otrava měkkýši)
AZP	Azaspiracid shellfish poisoning (Otrava azaspiracidy měkkýšů)
CCOHS	Canadian Centre for Occupational Health and Safety
CFP	Ciguatera fish poisoning (Otrava rybami Ciguatera)
DNA	Deoxyribonukleová kyselina
DSP	Diarrhetic shellfish poisoning (Průjmová otrava měkkýši)
ER	Endoplasmatické retikulum
HAB	Harmful algal bloom (škodlivý vodní květ)
LD ₅₀	Hodnota udávající množství dávky jedu, která zapříčiní smrt 50 % testovaných jedinců do 24 hodin od podání toxické látky
NSP	Neurotoxic shellfish poisoning (Neurotoxická otrava měkkýši)
PSP	Paralytic shellfish poison (Paralytická otrava měkkýši)
RNA	Ribonukleová kyselina
WHO	World Health Organization (Světová zdravotnická organizace)

12 Seznam použitých zdrojů

12.1 Literární

ADL, Sina M., Alastair G. B SIMPSON, David BASS, et al. The revised classification of eukaryotes. *The Journal of Eukaryotic Microbiology*. 2012, **59** (5), 429–493.

AQUILERA, Anabella, Esther BERRENDERO GÓMEZ, Jan KAŠTOVSKÝ, Ricardo ECHENIQUE a Graciela L. SALERNO. The polyphasic analysis of two native Raphidiopsis isolates supports the unification of the genera Raphidiopsis and Cylindrospermopsis (Nostocales, Cyanobacteria). *Phycologia*. 2018, **57** (2), 130-146.

BECKER, Wolfgang. Microalgae in Human and Animal Nutrition. RICHMOND, Amos, ed. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. 2. Noida: Blackwell Publishing, 2005, s. 312-350. ISBN 0-632-05953-2.

BLACKBURN, Susan. Water Pollution and Bioremediation: Eutrophication and Water Poisoning. RICHMOND, Amos, ed. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. 2. Noida: Blackwell Publishing, 2005, s. 417-429. ISBN 0-632-05953-2.

BLÁHA, Luděk, Pavel BABICA a Blahoslav MARŠÁLEK. Toxins produced in cyanobacterial water blooms – toxicity and risks. *Interdisciplinary Toxicology*. Brno, 2009, **2**(2), 36-41.

BOROWITZKA, Michael A. Pharmaceuticals and agrochemicals from microalgae. COHEN, Zvi, ed. *Chemicals from Microalgae*. New York: Taylor & Francis Group, 1999, s. 313-352. ISBN 0-7484-0515-1.

CARMICHAEL, Wayne W., GORHAM, P.R. Anatoxins from clones of *Anabaena flos-aquae* isolated from lakes of western Canada. *Mitt. Internat. Verin. Limnol*, 1978. **21**, 285–295.

ČÍŽKOVÁ, Dana, Romana ANDĚROVÁ a Michael CHINERY, STEINEROVÁ, Jana, ed. *Mořské řasy. Ilustrovaná encyklopedie evropské přírody*. 3. Praha: Nakladatelství Slovart, 2004, s. 161-163. ISBN 80-7209-650-8.

DALEFIELD, Rosalind. *Veterinary Toxicology for Australia and New Zealand*. Elsevier, 2017. ISBN 9780124202276.

DVOŘÁK, Petr, Dale A. CASAMATTA, Petr HAŠLER, Eva JAHODÁŘOVÁ, Alyson R. NORWICH a Aloisie POULÍČKOVÁ. Diversity of the Cyanobacteria. HALLENBECK, Patrick C., ed. *Modern Topics in the Phototrophic Prokaryotes: Environmental and Applied Aspects*. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 2017, s. 3-46. ISBN 978-3-319-46259-2.

GRIFFITHS, Dilwyn J. a Martin L. SAKER. The Palm Island Mystery Disease 20 Years on: A Review of Research on the Cyanotoxin Cylindrospermopsin. *Environmental Toxicology*. 2003, **18** (2), 78-93.

HARPER, David. *Eutrophication of Freshwaters: Principles, problems and restoration*. Dordrecht: Springer-Science+Business Media, B.V., 1992. ISBN 978-94-010-5366-2.

- HINDÁK, František. Oddelenie Cyanophyta – Sinice. HINDÁK, František, ed. *Sladkovodné riasy*. Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo, 1978, s. 284-286.
- HOEK, C. van den, D. G. MANN & Hans Martin JAHNS. *Algae: an introduction to phycology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995, xiv, 623 s. ISBN 0-521-31687-1.
- HRDINA, Vratilav, Jiří PATOČKA, Vladimír MĚRKA a Radomír HRDINA. Kyselina domoová, nebezpečný neurorotin. *Vojenské zdravotnické listy*. 2005, 74(2), s. 53-59.
- HRDINA, Vratilav, Vladimír MĚRKA, Jiří PATOČKA & Radomír HRDINA. Fykotoxiny a některé méně známé toxiny mořského původu. *Vojenské zdravotnické listy*. Karlova Univerzita v Praze, 2008, 77.(3.), s. 110-122.
- KALINA, Tomáš & Jiří VÁŇA. *Sinice, řasy, houby, mechorosty a podobné organismy v současné biologii*. Praha: Karolinum, 2005, 606 s., 32 s. obr. příl. ISBN 80-246-1036-1.
- KALINA, Tomáš. *Systém a vývoj sinic a řas*. Praha: Karolinum, 1994, 165 s. ISBN 8070668547
- KOČÍ, Vladimír, Jiří BURKHARD, Blahoslav MARŠÁLEK. Eutrofizace na přelomu tisíciletí. *Eutrofizace 2000*, Praha, 2000, s. 3-13.
- KOMÁREK, Jiří. Oddelenie Cyanophyta – Sinice. HINDÁK, František, ed. *Sladkovodné riasy*. Bratislava: Slovenské pedagogické nakladateľstvo, 1978, s. 238-283.
- KOMÁREK, Jiří, Jan KAŠTOVSKÝ, Jan MAREŠ a Jeffrey JOHANSEN. Taxonomic classification of cyanoprokaryotes (cyanobacterial genera) 2014, using a polyphasic approach. *Preslia* 86. 2014, s. 295-335.
- KUMAR, Jay, Divya SINGH, Madhu B. TYAGI a Ashok KUMAR. Cyanobacteria: Applications in Biotechnology. *Basic Science to Applications*. 1. Academic Press, 2019, s. 327-346. ISBN 9780128146675.
- LANDSBERG, Jan H., Sherwood HALL, Jan N. JOHANNESSEN, et al. Saxitoxin Puffer Fish Poisoning in the United States, with the First Report of Pyrodinium bahamense as the Putative Toxin Source. *Environmental Health Perspectives*. 2006, 114 (10), 1502-1507.
- LINHART, Igor. *Toxikologie: interakce škodlivých látek s živými organismy, jejich mechanismy, projevy a důsledky*. 2., upr. a rozš. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2014, 410 s. ISBN 978-80-7080-877-1.
- MARŠÁLEK, Blahoslav. Rozdělení cyanotoxinů – legislativa. In: MARŠÁLEK, Blahoslav a Olga HALOUSKOVÁ. *Cyanobakterie – biologie, toxikologie a možnosti nápravných opatření*. 2004, s. 41-43.
- NOVÁK, Jan & SKALICKÝ, Milan. *Botanika: cytologie, histologie, organologie a systematika*. Čtvrté vydání. Praha: Powerprint, 2017. 344 s. XIII stran obrazových příloh. ISBN 978-80-7568-036-5.
- OBORNÍK, Miroslav. Endosymbióza jako akcelerátor evoluce / Endosymbiosis as an Evolution Accelerator. *Živa*. Academia, 2009, (2.), s. 50-52.

- PATOČKA, Jiří. *Vojenská toxikologie*. Praha: Grada Publishing, 2004, 178 s. ISBN 8024706083.
- POULÍČKOVÁ, Aloisie, Petr DVOŘÁK & Petr HAŠLER. *Průvodce mikrosvětlem sinic a řas*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015, 46 s. Ostatní odborné publikace. ISBN 978-80-244-4408-6.
- POULÍČKOVÁ, Aloisie & Jaroslav JURČÁK. *Malý obrazový atlas našich sinic a řas*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2001, 81 s. ISBN 8024402424.
- PUMANN, Petr & Jindřich DURAS. *Atlas makroskopických jevů spojených s výskytem vodních květů sinic a dalších organismů v přírodních koupacích vodách*. 2. Praha: Státní zdravotní ústav, 2014.
- RUNDHAUG, JOYCE S., Susan M. FISCHER. Cellular and Molecular Mechanisms of Tumor Promotion. MCQUEEN, Charlene A. *Comprehensive Toxicology*. 2. Elsevier Science, 2010, s. 311-333. ISBN 978-0-08-046884-6.
- SCHANTZ, E. J., V. E. GHAZAROSSIAN, H. K. SCHNOES, F. M. STRONG, J. P. SPRINGER, John O. PEZZANITE a Jon CLARDY. The Structure of Saxitoxin. *Journal of the American Chemical Society*. 1975, **97** (5), 1238-1239.
- SKULBERG, Olav M. Bioactive Chemicals on Microalgae. RICHMOND, Amos, ed. *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. 2. Noida: Blackwell Publishing, 2005, s. 485-512. ISBN 0-632-05953-2.
- SOLTER, Philip F. a Val R. BEASLEY. Chapter 38 Phycotoxins. *Haschek and Rousseaux's Handbook of Toxicologic Pathology*. 3. Urbana: Academic Press, 2013, s. 1155-1186. ISBN 978-0-12-415759-0.
- ŠEJNOHOVÁ, Lenka a Blahoslav MARŠÁLEK. Pohled do mikroskopického světa sinic. *Živa*. Praha: Divize Nakladatelství Academia, 2005, (3.), str. 105-108. ISSN 0044-4812.
- TIDGEWELL, Kevin, Benjamin R. CLARK a William H. GERWICK. The Natural Products Chemistry of Cyanobacteria. *Comprehensive Natural Products II*. 2010, s. 141-188.
- VAN DER MERWE, Deon. Cyanobacterial (Blue-Green Algae) Toxins. GUPTA, Ramesh C., ed. *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents*. 2. Academic Press, 2015, s. 421-429. ISBN 978-0-12-800159-2.
- WHO. Chapter 7. Algae and cyanobacteria in coastal and estuarine waters. *Guidelines for safe recreational water environments: Volume 1 Coastal and fresh waters*. 1. Malta, 2003a, s. 136-158. ISBN 92-4-154580-1.
- WHO. Chapter 8. Algae and cyanobacteria in fresh water. *Guidelines for safe recreational water environments: Volume 1 Coastal and fresh waters*. 1. Malta, 2003b, s. 136-158. ISBN 92-4-154580-1.
- ZNACHOR, Petr. Vodní květy řas a sinic. *Scientific American české vydání*. 2005, **4** (3.), s. 42-51

12.2 Internetové

KOMÁREK, Jiří & Tomáš HAUER. Gloeobacter. *CyanoDB Classification: The on-line database of cyanobacterial genera* [online]. České Budějovice: Přírodovědecká fakulta JU, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.cyanodb.cz/#/Gloeobacter>

KRMENČÍK, Pavel a Jiří KYSILKA. Toxikon: Jedy Měkkýšů (Mollusca). *Biotox.cz* [online]. 2007 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <http://www.biotox.cz/toxikon/zivocich/mekkyysi.php>

MASOJÍDEK, Jiří. Řasy. *Centrum Algatech: Mikrobiologický ústav AV ČR, v.v.i. - vědecké pracoviště Třeboň* [online]. Třeboň: Centrum Algatech, 2014 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.alga.cz/c-548-co-vite-o-rasach-.html>

MIRANDOVÁ, Růžena. Ciguatoxin (ciguateratoxin) - postrach rybářů žijících v tropických oblastech. *Toxicology* [online]. České Budějovice, 2007, 30. 5. 2007 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <http://www.toxicology.cz/modules.php?name=News&file=article&sid=111>

NAVRÁTILOVÁ, Jana a Josef NAVRÁTIL. Eukaryotická buňka. *World of Plants: Sources for Botanical Courses* [online]. 2017, 7. 2. 2017 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://worldofplants.net/2017/02/07/eukaryoticka-bunka/>

Oddělení Cyanobacteria. *Www.sinicearasy.cz: Algologická laboratoř na katedře botaniky Přírodovědecké fakulty JU v Českých Budějovicích* [online]. České Budějovice: Přírodovědecká fakulta JU, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.sinicearasy.cz/134/Cyanobacteria>

PATOČKA, Jiří. Základy toxikologie (Kapitoly I až III). *Toxicology* [online]. České Budějovice, 2005, 28. 7. 2005 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <http://www.toxicology.cz/modules.php?name=News&file=article&sid=10>

ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, Jana. Průhlednost, zákal a barva vody. *Encyklopedie hydrobiologie: výkladový slovník* [online]. Praha: VŠCHT Praha, 2007 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-006/ebook.html?p=P040

What is a LD50 and LC50? *CCOHS: Canadian Centre for Occupational Health and Safety* [online]. 2020, 28. 7. 2005 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/ld50.html>

12.3 Zdroje obrázků

Obrázek 1: Buňka modrozelené kokální sinice. HOEK, C. van den, D. G. MANN & Hans Martin JAHNS. *Algae: an introduction to phycology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995, XIV., s. 17. ISBN 0-521-31687-1.

Obrázek 2: Řasa rodu *Anabaena* s popsaným heterocytem (H) a akinetou (A). ŠEJNOHOVÁ, Lenka a Blahoslav MARŠÁLEK. Pohled do mikroskopického světa sinic. Živa. Praha: Divize Nakladatelství Academia, 2005, (3.), s. 107. ISSN 0044-4812.

Obrázek 3: Aerotopa planktonní sinice *Dolichospermum*. POULÍČKOVÁ, Aloisie, Petr DVOŘÁK & Petr HAŠLER. *Průvodce mikrosvětlem sinic a řas*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015, s. 23. Ostatní odborné publikace. ISBN 978-80-244-4408-6.

Obrázek 4: Strukturální vzorec microcystinu. VAN DER MERWE, Deon. Cyanobacterial (Blue-Green Algae) Toxins. GUPTA, Ramesh C., ed. *Handbook of Toxicology of Chemical Warfare Agents*. 2. Academic Press, 2015, s. 422. ISBN 978-0-12-800159-2

Obrázek 5: Strukturální vzorec cylindrospermopsinu. Cylindrospermopsin. In: Cayman chemical [online]. 2020 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://www.caymanchem.com/product/10007867/cylindrospermopsin>

Obrázek 6: Strukturální vzorec nodularinu. ŽEGURA, Bojana, Alja ŠTRASER, Metka FILIPIČ. Genotoxicity and potential carcinogenicity of cyanobacterial toxins – a review. In: *Mutation Research*. Ljubljana, 2011, s. 19.

Obrázek 7: Strukturální vzorec lyngbyatoxinu. Lyngbyatoxin-a Chemistry Research Putrefaction Chemical substance, Indole Alkaloid, angle, white, text png. In: PNGWING [online]. 2020 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://www.pngwing.com/en/free-png-hchdl>

Obrázek 8: Strukturální vzorce aplysiatoxinu (vlevo) a debromoaplysiatoxinu (vpravo). RASTOGI, Rajesh Prasad. The chemical structure of some common cyanotoxins reported in diverse cyanobacteria. In: Research Gate [online]. 2015, [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/284019974_Bloom_Dynamics_of_Cyanobacteria_and_Their_Toxins_Environmental_Health_Impacts_and_Mitigation_Strategies/figures

Obrázek 9: Strukturální vzorec kyseliny domoové. HRDINA, Vratilav, Jiří PATOČKA, Vladimír MĚRKA a Radomír HRDINA. Kyselina domoová, nebezpečný neurotin. *Vojenské zdravotnické listy*. 2005, 74(2), s.55.

Obrázek 10: Strukturální vzorec brevetoxinu A a B. HRDINA, Vratilav, Vladimír MĚRKA, Jiří PATOČKA & Radomír HRDINA. Fykotoxiny a některé méně známé toxiny mořského původu. *Vojenské zdravotnické listy*. Karlova Univerzita v Praze, 2008, 77.(3.), s. 115.

Obrázek 11: Strukturální vzorec ciguateratoxinu. Bad Bug Book: Foodborne Pathogenic Microorganisms and Natural Toxins Handbook Pacific Ciguatoxin-1 and Carribean Ciguatoxin-1. In: *U.S. Food & Drug Administration* [online]. 2018, 25. 1. 2018 [cit. 2020-06-

28]. Dostupné z: <https://www.fda.gov/food/bad-bug-book-second-edition/bbb-ciguatoxin-chemical-structure>

Obrázek 12: Strukturní vzorec anatoxinu-a a homoanatoxinu-a. Structures of anatoxin-a and homoanatoxin-a. In: American Society for Microbiology: Applied and Environmental Microbiology [online]. Washington, 2020 [cit. 2020-07-07]. Dostupné z: <https://aem.asm.org/content/75/14/4909/figures-only>

Obrázek 13: Strukturní vzorec saxitoxinu. HRDINA, Vratislav, Vladimír MĚRKA, Jiří PATOČKA & Radomír HRDINA. Fykotoxiny a některé méně známé toxiny mořského původu. *Vojenské zdravotnické listy*. Karlova Univerzita v Praze, 2008, **77**.(3.), s. 117.

12.4 Zdroje tabulek

Tabulka 1: Systém sinic dle Komárek a kol. (2014).

KOMÁREK, Jiří a Tomáš HAUER. *CyanoDB Classification: The on-line database of cyanobacterial genera* [online]. České Budějovice: Přírodovědecká fakulta JU, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.cyanodb.cz/>

Oddělení Cyanobacteria. *Www.sinicearasy.cz: Algologická laboratoř na katedře botaniky Přírodovědecké fakulty JU v Českých Budějovicích* [online]. České Budějovice: Přírodovědecká fakulta JU, 2020 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <http://www.sinicearasy.cz/134/Cyanobacteria>

Tabulka 2: Zjednodušený systém řas.

ADL, Sina M., Alastair G. B SIMPSON, David BASS, et al. The revised classification of eukaryotes. *The Journal of Eukaryotic Microbiology*. 2012, **59** (5), 429–493.

POULÍČKOVÁ, Aloisie, Petr DVOŘÁK & Petr HAŠLER. *Průvodce mikrosvětlem sinic a řas*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2015, 46 s. Ostatní odborné publikace. ISBN 978-80-244-4408-6.

Tabulka 3: Příklady toxických druhů sinic a řas a konkrétní problémy, které způsobují.

ZINGONE, Adriana a Henrik O. ENEVODSEN. The diversity of harmful algal blooms: a challenge for science and management. *Ocean & Coastal Management*. 2000, **43** (8-9), s. 725-748.

Tabulka 4: Klasifikace toxických látek podle hodnoty LD₅₀ u člověka při perorálním podání.

PATOČKA, Jiří. Základy toxikologie (Kapitoly I až III). *Toxicology* [online]. České Budějovice, 2005, 28. 7. 2005 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <http://www.toxicology.cz/modules.php?name=News&file=article&sid=10>

What is a LD50 and LC50? *CCOHS: Canadian Centre for Occupational Health and Safety* [online]. 2020, 28. 7. 2005 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/ld50.html>

Tabulka 5: Známé případy otrav toxiny sinic.

CHORUS, Ingrid, Jamie BARTRAM, ed. *Toxic Cyanobacteria in Water: A guide to their public health consequences, monitoring and management*. London: E&FN Spon; 1999.

CODD Geoffrey A., Jaime LINDSAY, Fiona M. YOUNG, Louise F. MORRISON, James S. METCALF. Cyanobacterial Toxins. In: Huisman J, Matthijs HCP, Visser PM, editors. *Harmful Cyanobacteria*. Springer-Verlag. 2005a. s. 1–23.

CODD GA, MORRISON LF, METCALF JS. *Cyanobacterial toxins: risk management for health protection*. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2005b. s. 264–272.

Anotace

Jméno a příjmení:	Karolína Tichá
Katedra:	Biologie
Vedoucí práce:	Mgr. Eva Jahodářová, Ph.D.
Rok obhajoby:	2020

Název práce:	Řasy a sinice jako producenti toxických látek a jejich vliv na zdraví živočichů a člověka
Název v angličtině:	Toxin-producing algae and cyanobacteria and their influence on animal and human health
Anotace práce:	Bakalářská práce se zabývá obecnou charakteristikou skupin sinic a řas. Vysvětluje proces eutrofizace a vodního květu. Dále podává přehled toxických látek sinic a řas, s důrazem na sinice. Popisuje chemickou strukturu toxických látek či celých skupin toxinů a to, jak dané toxiny působí na živé organismy včetně člověka.
Klíčová slova:	Řasy, sinice, toxické látky, vodní květ, eutrofizace vod, vliv na organismus
Anotace v angličtině:	The bachelor thesis deals with the general characteristics of groups of cyanobacteria and algae. It explains the process of eutrophication and water bloom. It also provides an overview of toxic substances of cyanobacteria and algae, with accent on cyanobacteria. It describes the chemical structure of toxic substances or whole groups of toxins and describes how the toxins affect alive organisms, including humans.
Klíčová slova v angličtině:	Algae, cyanobacteria, toxins, water bloom, water eutrophication, influence on the organism
Přílohy vázané v práci:	-
Rozsah práce:	49 s.
Jazyk práce:	český