

**Univerzita Karlova  
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Biologie  
Studijní obor: Biologie



**Anna Hirnerová**

Diverzita a funkce vzorů v mikrosvětě

Diversity and function of pattern structures in the microworld

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Mgr. Pavel Škaloud, Ph.D.

Praha, 2022

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 5. 5. 2022

.....

Anna Hirnerová

## **Poděkování**

Děkuji svému školiteli doc. Mgr. Pavlu Škaloudovi, Ph.D. za jeho věčný optimismus a ochotu mi vždy poradit. Děkuji celé algologické laboratoři za cenné připomínky, hlavně Pět'ovi Knotkovi za jeho entusiasmus, sdílnost, vědomosti a publikace. Také děkuji všem přátelům, kteří mi poradili s technickými záležitostmi.

## **Abstrakt**

Tato práce shrnuje dosavadní poznatky o vzorech a strukturách v různých měřítcích s důrazem na využití daných vzorů v mikrosvětě a materiálu, z kterých jsou tvořeny. Vzory se uplatňují ve všech oblastech přírodních dějů i lidské činnosti a existuje velmi mnoho analogických modelů v různých měřítcích, nevíme ale, zda mají stejné sebeorganizační mechanismy vzniku. Mnoho vzorů tvořených mikroorganismy umíme připravit bez jejich přítomnosti na základě čistě fyzikálních a chemických metod, vznikají tedy pravděpodobně za určitých parametrů ovlivnitelných daným protistem. Tyto vzory jsou pro mikroorganismy evolučně výhodné, protože jim poskytují řadu funkčních adaptací, hlavně v souvislosti s obranou proti predátorovi a pohybem ve vodním sloupci, který se odvíjí od životní strategie organismu. Matematický popis vzoru je nesmírně důležitý pro jeho další zkoumání a určování zákonitostí, které organismu umožnily těžit z jeho parametrů.

**Klíčová slova:** vzor, struktura, konvekce, reakčně – difuzní model, geometrie, protista, mikroorganismy, kostry, schránky, šupiny

## **Abstract**

This thesis summarizes current knowledge of patterns and structures at various scales, with an emphasis on the use of these patterns in the microworld and also on the materials that are most often used. Patterns are applied in all areas of natural processes and human activity. There are many analogous models at different scales, but we do not know if they have the same self-organizing mechanisms. Many patterns formed by microorganisms can be prepared without their presence, on the basis of physical and chemical methods, so they are probably created under certain parameters that can be influenced by a given protist. These patterns are evolutionarily advantageous for microorganisms, because they provide them with a number of functional adaptations, mainly in connection with defense against predators and movement in the water column, which is based on the organism's life strategy. The mathematical description of the pattern is extremely important for its further research and for determining the laws that have allowed the organism to benefit from its parameters.

**Keywords:** pattern, structure, convection, reaction – diffusion model, geometry, protist, microorganism, skeletons, shells, scales

## Obsah

1 Úvod.....	1
2 Materiály .....	4
2.1 Křemičitany .....	4
2.2 Uhličitan vápenatý .....	5
2.3 Síran strontnatý (celestin).....	6
2.4 Chitin .....	7
2.5 Celulóza a další polysacharidy .....	7
2.6 Biomineralizace .....	8
3 Chemické a fyzikální vzory mikroorganismů .....	9
3.1 Konvekce .....	9
3.2 Reakčně – difuzní systémy .....	10
4 Strukturní vzory mikroorganismů .....	12
4.1 N-úhelníky .....	12
4.2 Kruhy .....	17
4.3 Spirály.....	20
4.4 Fraktály.....	22
5 Závěr.....	25
6 Zdroje .....	27

# 1 Úvod

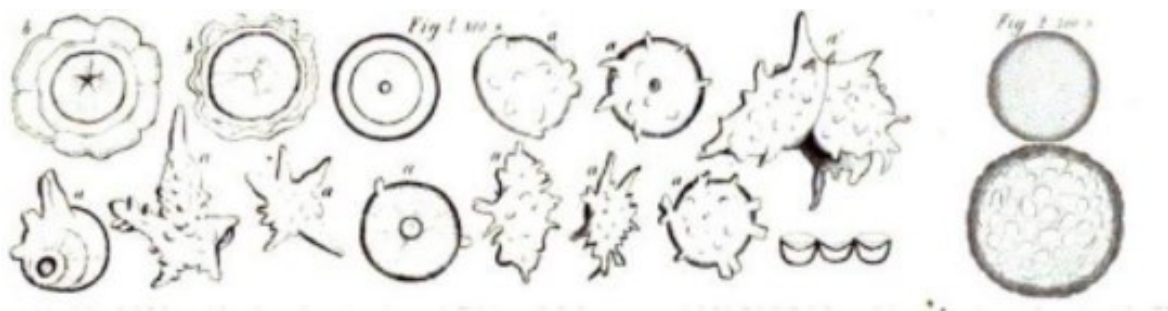
Vzory jsou v přírodě všudypřítomné – od systému uspořádání molekul ve sněhové vločce nebo krystalu, až k dynamice společenstev a formaci galaxií. Mnoho prostorových vzorů je podobných napříč délkovými měřítky, ale je stále nejasné, zda mají analogické vzory stejné sebeorganizační mechanismy vzniku (Landge et al., 2020). Schopnost tvorby prostorových a časoprostorových vzorů je jedna z nejzajímavějších vlastností dynamických systémů. Můžeme je studovat i v dynamice tekutin (Rayleigh-Bernardovy konvekční vzory), nebo mohou vysvětlit mnoho ekologických i sociologických otázek (Maini, 2004). Existuje obrovské množství matematických modelů, které vysvětlují formace vzorů v mnoha oblastech.

Organismy řeší problémy spojené s žitím v různých prostředích pomocí mnoha struktur a tvarů, které jim poskytují rozmanitou paletu výhod. Z makrosvětla známe mnoho vzorů a struktur na povrchu organismů. U rostlin došlo k adaptacím v souvislosti s manipulací hmyzu – ať už jde o důmyslnou mimizezi napadení listožravým hmyzem typicky u rodu *Monstera* (Lubenow, 2011), nebo bezpočet květních vzorů lákajících opylovače (Penny, 1983). Trichomy na rostlinných tělech mohou sloužit k vylepšení vodního metabolismu, ochraně před herbivory nebo vyměšování silic a k mnoha dalším (Werker, 2000).

U živočichů známe mnoho typů vzorů a barev sloužících k různým funkcím – od splynutí s okolím, přes výstražná zbarvení, až po výrazné vzory usnadňující samičce výběr toho nejlepšího pohlavního partnera (Pasteur, 1982). Motýli tvoří své vzory a barvy fyzikálně - pouhým odrazem světla na velmi drobných šupinkách, které pokrývají jejich křídla (Saranathan et al., 2010). Často se ale setkáváme s barvami, které jsou tvořeny chemicky. Hojně zkoumanými jsou vzory velkých savců, například pruhy zeber sloužící k odrazení krevsajícího hmyzu (Caro et al., 2014), nebo skvrny žiraf, které mají ve stádové hierarchii mnoho různých funkcí (Fennessy, 2019).

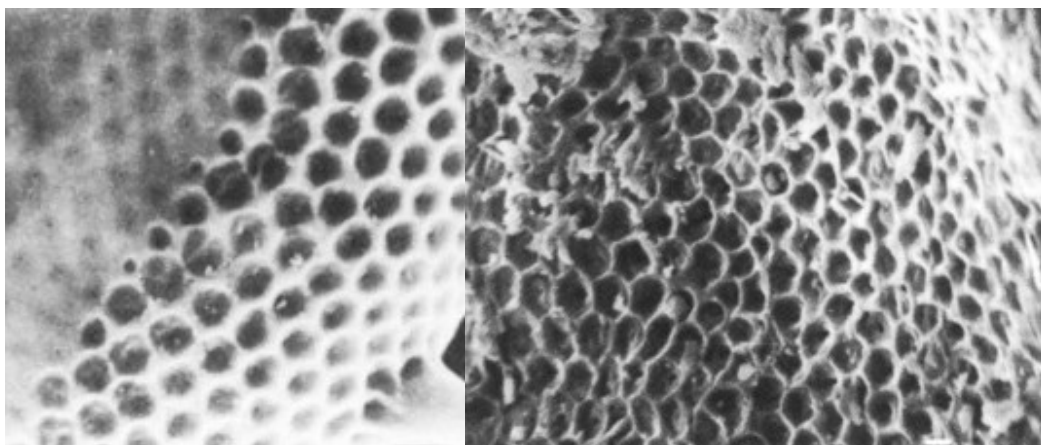
V zájmu lidstva je vzory zkoumat nejen pro estetické účely, ale hlavně pro praktické inovace přinášející společnosti nové benefity. Mnoho vzorů známých z malých měřítek jsme schopni vytvořit pouze metodami, které jsou nesmírně drahé a je tedy žádoucí, abychom se naučili používat mechanismy fungující v přírodě. Ku příkladu výzkum Pietra Hartinga se soustředil na výrobu vápenatých struktur pouze „ve zkumavce“, chemicky a bez přispění

jakéhokoliv živého organismu (Harting, 1872). Není zcela jasné, jaké procesy v Hartingových nádobách fungovaly nebo zda jde o ty, které způsobují vzorování biologických materiálů. Harting použil gelovité látky jako je albumin a želatina, tedy směsi s nízkou viskozitou a tím způsobenou velmi pomalou difuzí rozpuštěných chemických látek. Povedlo se mu tedy vytvořit tzv. reakčně – difuzní systém, ve kterém byla limitována četnost reakcí chemických komponent mírou jejich schopnosti difundovat. Ze směsí uhličitanu vápenatého a fosforečnanů s produkty organismů jako je krev a žluč získal pláty různých velikostí a zakřivení pokryté jemnými nitkami. Kombinací jiných poměrů získal i bradavičnaté a rozvětvené útvary připomínající spikuly (Obr. 1).



Obr. 1: Příklady Hartingových struktur (Harting, 1872).

Na tento výzkum navázaly další týmy schopné vytvořit vzory mnohem rozmanitější, složitější a ve větším měřítku. V roce 1995 se použitím aluminofosfátového materiálu začaly uměle vytvářet objekty škálou vzorování srovnatelné s rozsivkami a schránkami radiolárií (Oliver, 1995; Obr. 2).



Obr. 2: Vlevo skeletální struktura rozsivky *Challengrosium avicularis*, vpravo uměle vytvořená struktura (Oliver, 1995).



Proces vzniku vzoru je často iniciován náhlými nestabilitami, které nastávají při překročení nějakého kritického parametru. Dva běžné aspekty těchto nestabilit jsou narušení symetrie a charakteristická vlnová délka, určující konkrétní velikost rysů vzoru (Ball, 1999; Golovin & Nepomnyashchy, 2004). Narušení symetrie předchází přechodu od jednotného k diferenciovanému a zároveň spontánní vzory představují vždy kompromis. Například statické Turingovy struktury nelineárních chemických reakcí nejsou ničím jiným než kompromisem mezi reakcí a difuzí, krátkodobou aktivací a dalekosáhlou inhibicí. Dalším příkladem je povrchové napětí omezující velikost panožky, což je v konkurenci s nestabilitou podporující větvení. Výsledkem je pak baňatost útvaru (Ball, 1999). Zdá se tedy, že složitost vzoru je výsledkem kompetice dvou a více protichůdných sil. Při příliš jednostranném tlaku forma zmizí a vznikne útvar bez struktury (Ball, 1999). Vzor se tedy objevuje při takové míře protichůdných tendencí, kdy soupeřící síly odstraní uniformitu, ale nemohou zcela vyvolat chaos (Ball, 2015).

Je velmi složité mluvit o vzorech v obecné rovině. Zcela jiný objem vědomostí máme v mikro a makro měřících, a mechanismy zanedbatelné v těchto měřítkách jsou klíčové pro porozumnění procesům probíhajícím na nano úrovni (Golovin & Nepomnyashchy, 2004).

Také fyzika tekutin působící na organismy je v mikrosvětě na rozdíl od makrosvěta velmi odlišná. Jedním z nejvýznamnějších faktorů je viskózní tlumení, které v mikrosvětě převažuje nad setrvačnými silami (Rusconi & Stocker, 2015). Viskózní tlumení je určitý typ tření mezi tekutinou a přilehlým pohybujícím se objektem, k jehož překonání je u pohybujících se objektů potřeba počítat se ztrátou energie. Téměř neutrální vztlak mikroorganismů a hydrodynamické procesy jako je stoupání nebo klesání ve vodním sloupci jsou zanedbatelné v porovnání s většinou parametrů toku vody. Proud vytváří točivou sílu, která v kombinaci s různou morfologií vytváří široké centrum životních strategií (Rusconi & Stocker, 2015).

Cílem této bakalářské práce je sumarizace poznatků o nejvýznamnějších typech vzorů, které se v mikrosvětě vyskytují.

## 2 Materiály

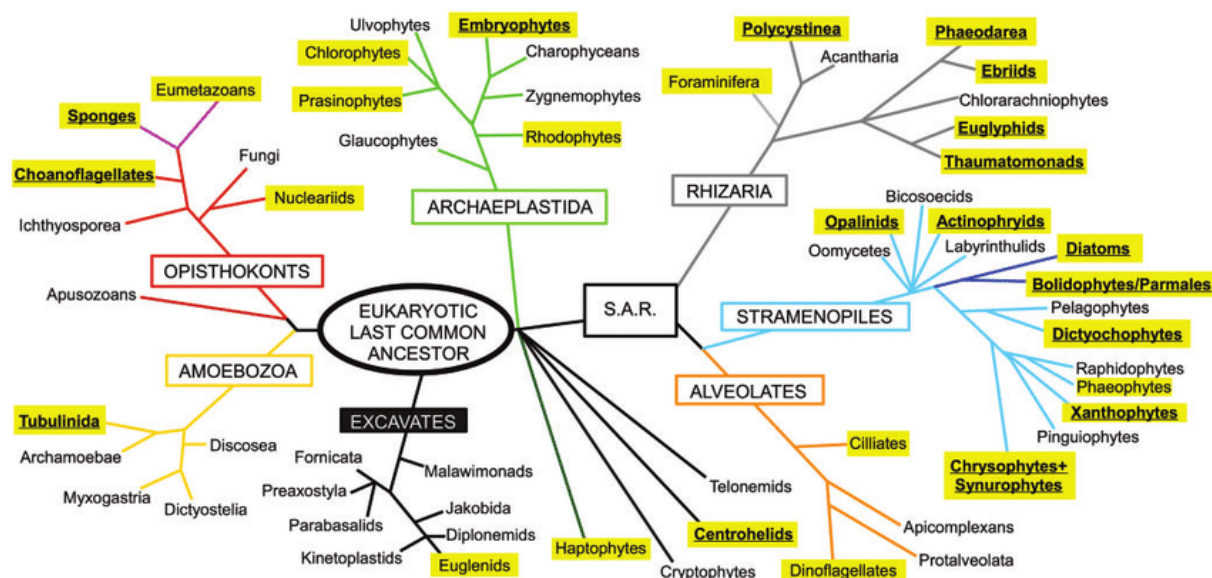
V makrosvětě je široké spektrum stavebních látek, které jsou používány k zajištění ochrany, stability nebo příjmu potravy organismů. V mikrosvětě se setkáme hlavně s užitím křemičitanů, uhličitanu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ ) a za zmínku určitě stojí i využití síranu strontnatého ( $\text{SrSO}_4$ ). Z organických materiálů se můžeme setkat s různými typy exopolysacharidů jako jsou xanthany, algináty, glukany, mannany a hlavně chitin nebo celulóza (Steinfeld et al., 2019). Je zde velká diverzita struktur. Některé mikroorganismy mají nahé buňky, jiné svá těla obalují více nebo méně rigidní buněčnou stěnou, a nebo se zahalují do jedné nebo více vrstev různých šupin. Některé buňky jsou obaleny slizem a jiné zase tvoří volně padnoucí loriky. Často dochází k sekreci ještě dalších materiálů na schránku - například celulózové pláty obrněnek jsou celé obklopeny ještě jednou vnější membránou, která se skládá z materiálu podobnému sporopoleninu (Bourne et al., 1983). Mřížovci mají buňku rozdělenou na vnitřní část ohraničenou chitinovou kostrou a celá buňka je obalená amorfním křemíkem nebo síranem strontnatým tvořícím neuvěřitelné tvary (Boltovskoy et al., 2005). Diverzita vzorů na všech povrchových materiálech je způsobená řízenou krystalizací daného materiálu.

### 2.1 Křemičitany

Jde o druhý nejčastější prvek země, který se nikdy nenachází samostatně, ale vždy ve formě různých sloučenin s kyslíkem (konkrétně jde o křemičitany, skla a oxid křemičitý). Tyto kombinace tvoří asi 75% zemské kůry (Lane & Burns, 1996). Využití křemíku různými organismy je nasnadě - mnoho z nich ho běžně využívá ke stavbě svých schránek. Velmi pravděpodobně jde o nejstarší a nejrozšířenější minerál využitý v jejich kostrách (Demadis, 2018). Několik skupin protist schraňuje tento prvek v amorfní formě oxidu křemičitého intracelulárně ve váčcích, které označujeme jako křemík-depozitní váčky. Křemičité kostry, frustuly, loriky nebo šupiny jsou výsledkem vnějšího ukládání oxidu křemičitého (Preisig, 1994). Diverzita vzorů a ornamentů na křemičitých strukturách je obrovská a často velice důležitá z taxonomického hlediska (Preisig, 1994).

Křemičité kostry a schránky nalezneme hlavně u linie Stramenopiles, skupinou nejbohatší na sofistikované vzory jsou jednoznačně rozsivky. Také zlativky mají na svých

křemičitých šupinách mnoho zajímavých vzorů a v řádu Parmales nalezneme organismy kryjící se pláty z tohoto materiálu. Mnoho protist tvoří také křemičité cysty (Obr. 3).



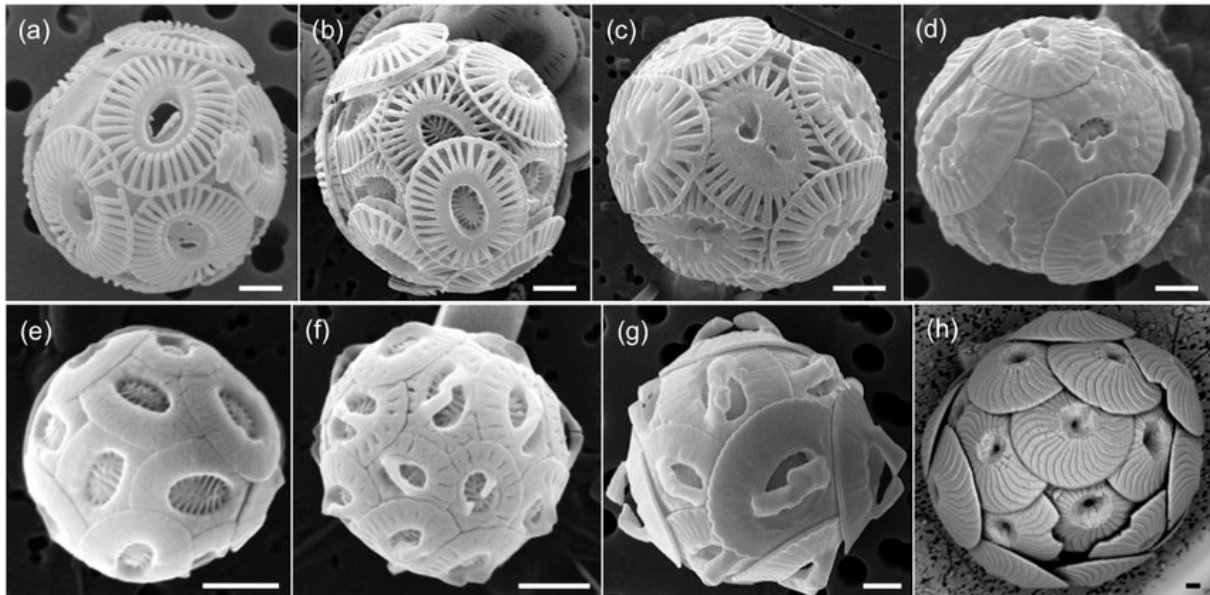
Obr. 3. Fylogenetický strom podle Adl et al. (2012), žlutě zvýrazněné skupiny mají alespoň jeden druh využívající křemík. Podtržené a zvýrazněné taxony jsou velmi výrazně silifikovány (Marron et al., 2016).

Chování oxidu křemičitého závisí na úpravě vody, na morfologii (velikosti pórů, tloušťky stěny pórů, konektivity) a struktuře materiálu (Gouze et al., 2014). Například funkce schránek rozsivek je hojně zkoumána díky jejich využití v nanotechnologiích (Mishra et al., 2017). Funkcí těchto schránek je mnoho, hrají roli anti-virové bariéry, propouští jen objekty určité velikosti a chrání buňku proti nebezpečným vlnovým délkám (Ferrara et al., 2014; Milligan & M Morel, 2001).

## 2.2 Uhličitán vápenatý

Vápenaté krystaly mohou vznikat dvěma způsoby – na makromolekulách tvořené matrici nebo v membránou vymezených váčcích. Výsledkem první možnosti je vysoce organizovaná struktura krystalů zabudovaná v organické matrix, jejíž hlavními součástmi jsou hydrofobní proteiny nebo polysacharidy. Struktury z váčků mívají komplexní tvary a hladké povrchy (Berman et al., 1993). V souvislosti s využitím uhličitánu vápenatého je třeba zmínit biomineralizaci kokolitek, která velmi ovlivňuje cyklus anorganického i organického uhlíku na Zemi. Jejich důležitost v souvislosti s těmito biogeochemickými jevy vznikla, když si

některá haptofytní protista vyvinula schopnost řídit růst krystalů  $\text{CaCO}_3$  na již existujících organických šupinách (Vargas et al., 2007). Kokolithogeneze (biomineralizace kokolithoforu, Obr. 4) je regulovatelná v závislosti na mnoha vnějších i vnitřních podmínkách, jako je například fáze životního cyklu nebo pH prostředí (Vargas et al., 2007).



Obr. 4.: Abundantní kokolity v jihovýchodním pacifiku – (a-d) Morfotypy *Gephyrocapsa huxleyi* s různými stupni kalcifikace (a – lehce kalcifikovaná, d – velmi kalcifikovaná), *G. parvula* (e), *G. ericsonii* (f), *G. muelleriae* (g), *Calcidiscus leptoporus* (h), (von Dassow et al., 2017).

## 2.3 Síran strontnatý (celestin)

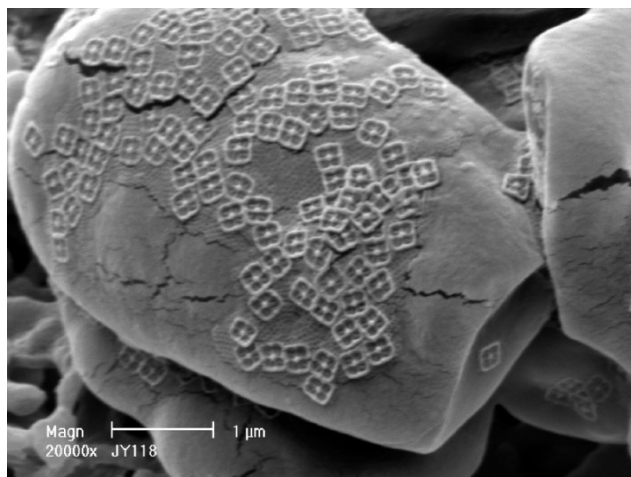
Dávní předci mřížovců stavěli své schránky pravděpodobně pouze z celestinu (Boltovskoy et al., 2005). Je vysoce pravděpodobné, že v tom hrálo roli vysoké procento síranů v tehdejších oceánech. Časem začali celestin nahrazovat syntézou opálu ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ). Narozdíl od linie Acantharia, která dodnes staví své kostry pouze z celestinu, rod *Collosphaera* ukládá křemík i celestin (Boltovskoy et al., 2005).

## 2.4 Chitin

Jde o polysacharid N-acetylglukosaminových jednotek a je v přírodě využíván mnoha organismy z různých taxonomických skupin. Udává se, že je to nejčastější polymer v oceánu, a na souši hned po celulóze druhý nejčastější. O protistech je v porovnání s houbami a hmyzem známo ohledně chitinu velmi málo. Mnoho protistních parazitů chitin produkuje, má u nich roli v ochraně před mechanickým a chemickým stresem a přispívá k udržování tvaru jejich buněk (Steinfeld et al., 2019). Je ale známý i u protist nevyznávajících parazitický způsob života - některé rozsivky dokáží produkovat tenká chitinová vlákna natahující se ven z téky speciálními póry (Durkin et al., 2009). Dokonce byl nalezen i u nálevníků *Eufolliculina uhligi* (Mulisch, 1991) nebo v cystách *Blepharisma undulans* a *Pseudomicrothorax dubius* (Mulisch & Hausmann, 1989). Některé druhy rodu *Chlorella* dokonce napadá speciální typ viru nazývaný chlorovirus, který dokáže indukovat syntézu chitinu na povrchu buňky (Rakkhumkaew et al., 2018).

## 2.5 Celulóza a další polysacharidy

Celulóza je nejčastější polymer na zemi a nevýznamější polysacharidový komponent buněčných stěn řas, protist i vyšších rostlin (Niklas, 2004). Její struktura je velmi podobná struktuře chitinu, liší se jen v uspořádání glukóz v řetězci. Významně využívají celulózu například obrněnky (Chan et al., 2019), zajímaví jsou z hlediska vzorů i zástupci polyfyletické třídy Prasinophyceae a jejich polysacharidové šupiny, které obsahují neobvyklé monosacharidy a schopnost jejich syntézy byla pravděpodobně převzata od endosymbionta (Becker et al., 1994). Jde pravděpodobně o nejstarší skupinu zelených řas a dá se tedy předpokládat, že vznik jejich šupin byl prvním pokusem o pokryv buňky v zelené linii řas (Obr. 5).



Obr. 5: *Pyramimonas* sp., vzorované celulóznové pláty, převzato z mikrotax.org, copyright: JRYoung – SEM plankton

Cytologicky vnější struktury (ať už křemičité, celulóznové nebo vápenaté) mohou být obklopeny nějakým dalším druhem organického povlaku. Jak popisuje Hecky et al. (1973) u rozsivek, tento povlak se skládá z vnitřní vrstvy bohaté na bílkoviny, která pak slouží jako templát k ukládání oxidu křemičitého a vnější polysacharidové vrstvy sloužící jako „narázník“ mezi buňkou a prostředím. U organismů využívajících uhličitan vápenatý je proces velmi podobný (Klaveness & Paasche, 1979).

## 2.6 Biomineralizace

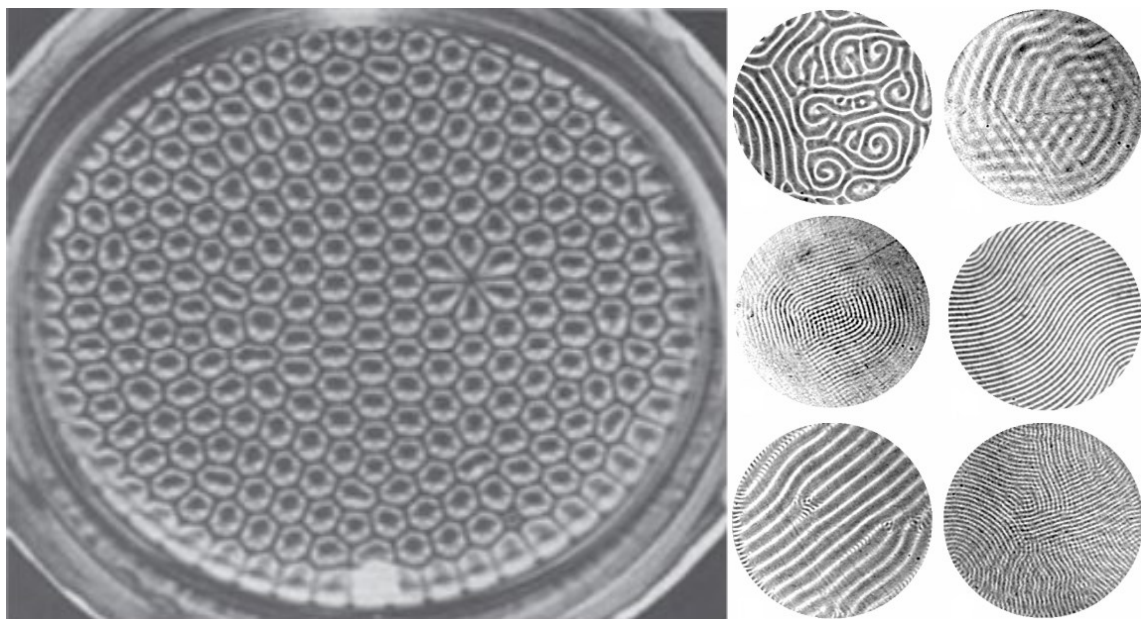
Jde o velmi složitý proces, který umožňuje vznik komplexních struktur díky organickým matricím fungujícím jako templáty pro organizaci neorganických struktur (Berman et al., 1993; Tampieri et al., 2014). Mistry v biomineralizaci jsou rozsivky a mřížovci co se týče křemíku, uhličitan vápenatý dokáží zužitkovat hlavně kokolitky a dírkonožci (Raven & Giordano, 2009). Organismy jsou schopné si pomocí svého metabolismu uložit minerály do tkání nebo do jejich bezprostředního okolí (Skinner, 2000). Nejvíce křemičitých koster je tvořeno oxidem křemičitým (Demadis, 2018). Různé organismy využívají různé prvky, takže je velmi pravděpodobné, že biomineralizace vznikla v evoluci nezávisle a několikrát (Preisig, 1994).

## 3 Chemické a fyzikální vzory mikroorganismů

Všechny vzory v přírodě vznikají mechanismy, které se dají chemicky, fyzikálně nebo matematicky popsat. S rozvojem lidského vědění došlo k odklonění od mnohých vysvětlení tvrdících opak, protože s postupujícím technickým vývojem můžeme stále více věcí popsat, zobrazit a namodelovat.

### 3.1 Konvekce

Nejznámější je Rayleigh – Bénardova konvekce, která nastává při zahřívání vrstvy tekutiny zespodu, což má za následek spontánní vznik konvekčního proudění (Obr. 6). Horká tekutina pluje nahoru a ta studenější dolů (Zeytounian, 2009). Dva vzory jsou tímto způsobem tvořeny velmi často – v prvním případě proudění tekutiny tvoří válce, což má za následek proužkovaný vzor. Tyto válce mohou být ohnuté a tvořit spirály nebo terčovitě vzory (Assenheimer a Steinberg, 1994). Kapalina ale může proudit i dalším typickým způsobem a tvořit hexagonální buňky. U některých tekutin tento vzor vzniká pohybem směrem nahoru na hranici mezi buňkami, někdy je pohyb opačný (Pesch & Kramer, 1996). Systém může tvořit i struktury spirální nebo koncentrické kruhy (Sparrow et al., 1978).



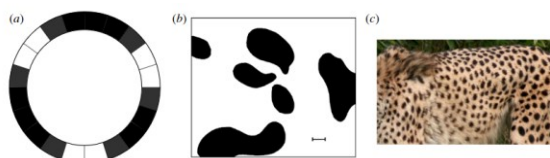
Obr 6: Příklady vzorů Rayleigh – Bénardovy konvekce za různých podmínek (Mennin, 2010; Rogers et al., 2000).

Zmíněné vzory se nachází v naprosto odlišných fyzikálních systémech napříč měřítky. Hexagonální struktury tohoto typu samovolně vznikají například v nano – pórech v oxidu hlinitém vyrobeném anodizací (Masuda & Fukuda, 1995). Méně rozšířené vzory vzniklé konvencí jsou čtvercové (Joets & Ribotta, 1986) a lze také sledovat vzory kvaziperiodické – tedy na malé ploše periodické, ale ve větším měřítku nepředvídatelné (Edwards & Fauve, 1994).

## 3.2 Reakčně – difuzní systémy

Směr chemické reakce může podle výpočtů ze zákonů chemické dynamiky nabývat za určitých okolností oscilačního charakteru (Lotka, 1910). Tato reakce může za určitých podmínek udržovat oscilace donekonečna (Lotka, 1920). Schéma se dá aplikovat nejen na reagující chemikálie, ale i k popisu hrubých interakcí, například mezi populací predátorů a množící se populací kořisti (Israel, 1988). Spontánní formace vzoru a formy v systému daleko od svého rovnovážného stavu se objevuje v mnoha typech přírodních procesů (Ball, 2015).

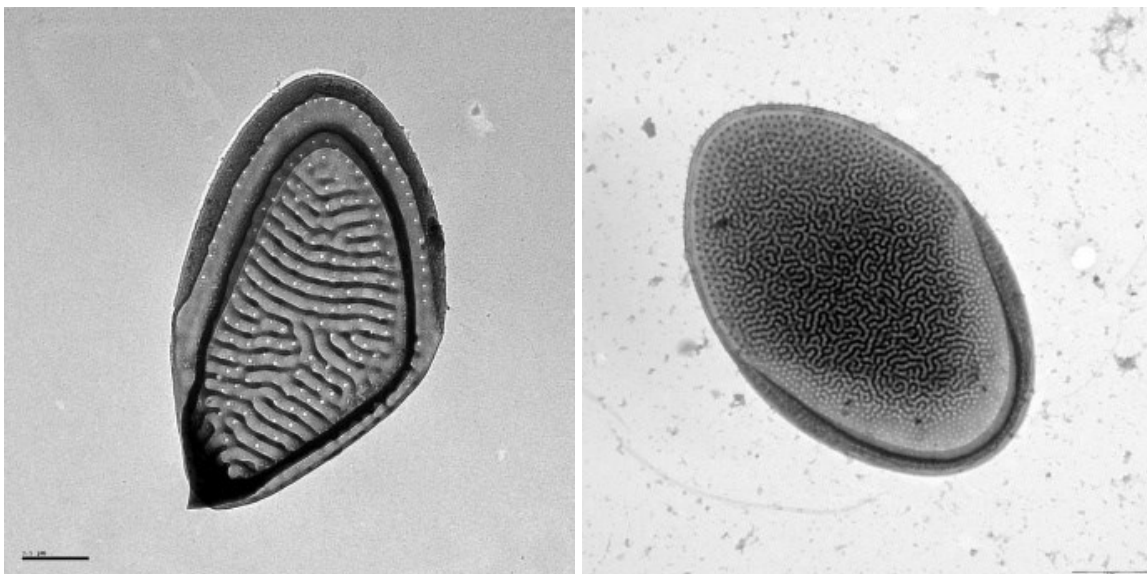
Alan Turing (1952) vypočítal matematický model, který vysvětloval, jak náhodné fluktuace dokáží způsobit tvorbu vzoru. Tento model nabízí nejuniverzálnější popis mechanismů vedoucích ke vzniku systémů, které zdánlivě nemají nic společného - od pruhů rybiček *Danio rerio* (Nakamasu et al., 2009) až po distribuci zločinců na planetě (Short et al., 2010). Teorie je založena na krátkém dosahu aktivace a inhibice dlouhého dosahu. Podle rozdílu mezi koncentracemi aktivátoru a inhibitoru a hustotou zdroje dochází k reakčně – difuzní reakci a výsledkem je vzorování objektu (Gierer & Meinhardt, 1972). Záleží tedy na určitých chemických substancích, které spolu při difuzi médii reagují. Každá substance se pohybuje z oblasti s vyšší koncentrací do oblasti s tou nižší, a jak rychle se tak stane, je dáno „difusibilitou“ média (Turing, 1952). Polarita vzoru je závislá na směru zdroje gradientu a celý systém je samoregulační (Gierer & Meinhardt, 1972).



Obr. 7: (a) Vzor distribuce morfogenů ve zkoumaném kruhu buněk, šedá pole značí rozdíly koncentrací. (b) Skvrnitý vzor vypočítaný ze schématu morfogenů ve 2D, (c) použití mechanismu v přírodě (Ball, 2015).



Koncentrace chemikálií stoupají a klesají okolo prstence (Obr. 7) dvěma způsoby – buď jsou vlny stojaté (jako např. akustické vlny), kde nejvyšší a nejnižší koncentrace zůstávají na stejném místě tvoříc sadu pruhů. Druhou možností je oscilační vlnění, při kterém se nejvyšší a nejnižší body pohybují v kruhu (Ball, 2015). Může vzniknout více vln různých vlnových délek a jejich rušení vyústí v sadu ‚kaněk‘ rozdílných velikostí tvořících nepravidelné vzory (Turing, 1952). Podmínkou pro vytvoření stabilního vzoru je místní aktivace a inhibice na dlouhé vzdálenosti (Gierer & Meinhardt, 1972). Tato definice naznačuje, že některé buněčné procesy (například jejich migrace nebo nervový signál) mohou nahradit efekt difuze v originálním Turingově modelu. Může jít o spontánní formace polarizovaných buněčných domén (Bel et al., 1987), vzory tohoto typu tvoří i kolonie *Escherichia coli* nebo *Salmonella typhimurium* (Budrene & Berg, 1995) a stejně tak se uspořádávají neurony ve zrakové kůře reagující přednostně na vstup z jednoho nebo druhého oka (Swindale, 1980). V mikrosvětě se vyskytují naprosto běžně, například na šupinách některých chrysomonád (Obr. 8).



Obr 8: zleva šupina *Mallomonas schwemmlii*, *M. oviformis* – převzato z chrysophytes.eu

## 4 Strukturní vzory mikroorganismů

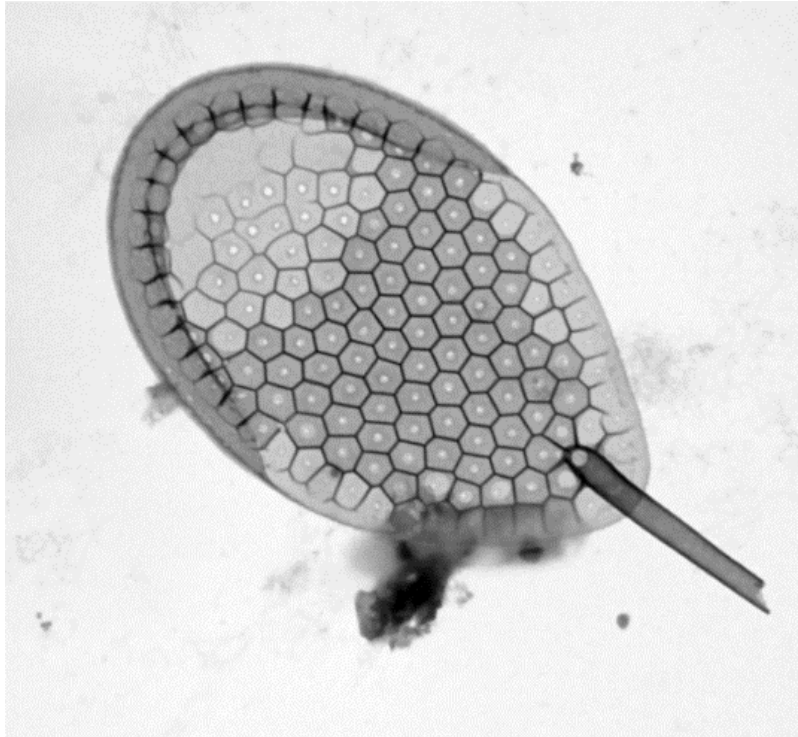
Na rozsivkách, které vykazují obrovskou diverzitu různých povrchových struktur, je velmi často zkoumán mechanismus jejich vzniku. Mají speciální transportéry, které dokáží transformovat přijatou kyselinu křemičitou do složitých tvarů složených z nanostruktur (Kent et al., 2009). Tyto struktury jsou pravděpodobně tvořeny v silika-depozitních váčcích, které v sobě mají kyselé prostředí, což nutí kyselinu křemičitou polymerovat (Geddes & Birch 2000). Finální vzor je samozřejmě ovlivněn mnoha vnějšími faktory, jako je například teplota nebo povrchové napětí (Parkinson et al., 1999).

Různé povrchové struktury si organismy tvoří většinou za účelem ochrany proti predátorovi nebo k usnadnění mobility. Například u chrysomonád je morfologie šupin dána i její pozicí na buňce (Siver, 1987), kyselostí vody (Gavrilova et al., 2005) nebo teplotou a intenzitou UV záření (Němcová et al., 2010).

Morfologie a ultrastruktura protist reflektuje klíčové aspekty ekologických nik, které obývají (Finlay, 2004). Velmi významnou schopností fytoplanktonu je způsob, jakým manipulují svůj vztlak. Tvarový odpor vyjadřuje, o kolik rychleji nebo pomaleji se částice jakékoliv formy ponoří do tekutiny, než koule ekvivalentního objemu (Padisak et al., 2003). Značí se číslem  $\Phi$ , jehož hodnota se snižuje ve vláknitých formách klesajících pomaleji a naopak ve válcovitých tvarech fytoplanktonu stoupá (Padisak et al., 2003).

### 4.1 N-úhelníky

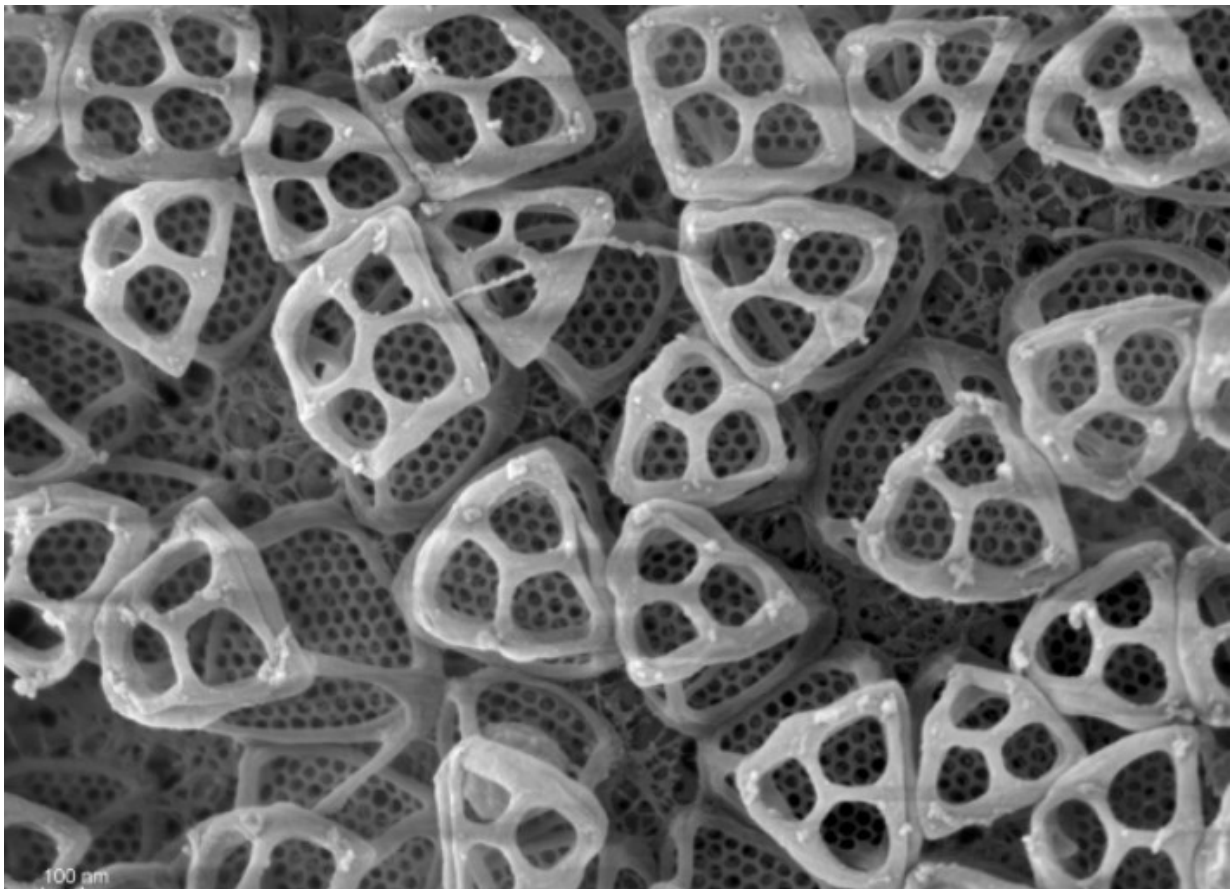
Pokud je třeba vyplnit plochu co možná nejefektivněji, nabízí se využití šestiúhelníku, čtverce, nebo trojúhelníku. Z hlediska materiálu jsou nejvíce ekonomické šestiúhelníky, protože součet jejich stran vyplňující daný prostor je vždy nižší než u jiných úhelníků (Ball, 1998). Krásným příkladem je *Synura mollispina* (Obr. 9), která si v případě dostatku křemíku spojuje papily na šupinách do hexagonálních struktur (Siver, 1988).



Obr. 9: Příklad využití hexagonů v ploše na šupině *Synura mollispina*, převzato z chrysophytes.eu

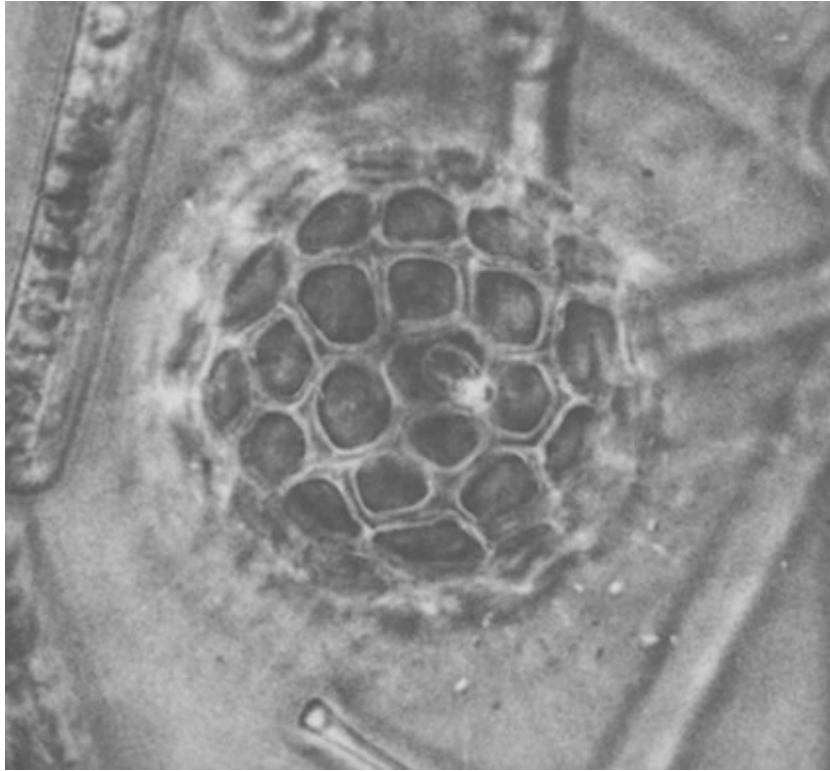
Nedostatek křemíku se u chrysomonád projevuje narušením tvorby šupin, v suboptimálních podmínkách můžeme pozorovat narušenou ornamentaci a v případě absence křemíku jsou buňky zcela bez šupin (Sandgren & Hall, 1996).

Kostru mřížovců tvoří mnoho vzorů, které jsou pozorovány jenom v této linii. Můžeme u nich vidět například i pravidelný dvacetistěn, dvanáctistěn nebo osmistěn, což má obdobu pouze v pylových zrnech a antheridiích linie Characeae (Afanasieva, 2006). Ačkoliv jsou radiolární skelety velmi složité, patří mezi nejjednodušší konstrukce. Pravidelnost tvarů v organismech se dá vysvětlit ekonomikou použitého materiálu. Šestihránná mřížka je schopná odolat nejlépe rovnoměrnému tlaku tekutiny, zatímco čtvercová mřížka vykazuje větší stabilitu při nárazech (Mordukhai-Boltovskoy, 1936). Například skupina Astrospheridae má vnitřní a vnější kostru, kde ta vnější má čtvercové otvory a vnitřní, na kterou působí rovnoměrný tlak, má otvory šestistranné (Khabakov et al., 1959). Dalším organismem tvořící kombinaci čtverců a hexagonů je například améba *Cochlopodium larifeili* (Kudryavtsev, 1999; Obr. 10).



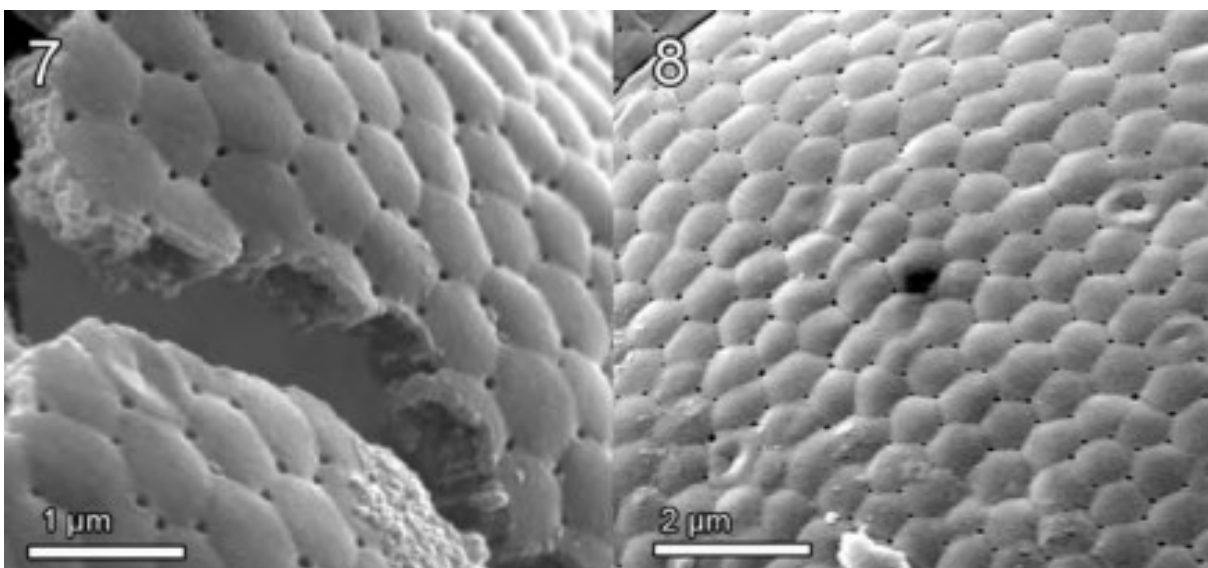
Obr. 10: Šupiny améby *Cochlopodium larifeili*, převzato z penard.de

Mnoho vědců se nechalo fascinovat exoskelety mřížovců. Ačkoliv Haeckel (1998) často ilustroval velmi symetrické a struktury, ve skutečnosti tak perfektní rozhodně nejsou. Typickým příkladem je uzavřená koule tvořená pouze z hexagonů – nic takového není podle D'Arcyho Thompsona (1942) možné, protože podle Eulerovy rovnice mnohostěnu není možné ho uzavřít, aniž by na celém povrchu nebylo alespoň 12 pětiúhelníků. Toto je patrné například u druhu *Clathrulina elegans* (Obr. 11), která produkuje velké množství mikrotubulů sloužících jako předloha pro tvorbu anorganického obalu (Young et al., 1995).



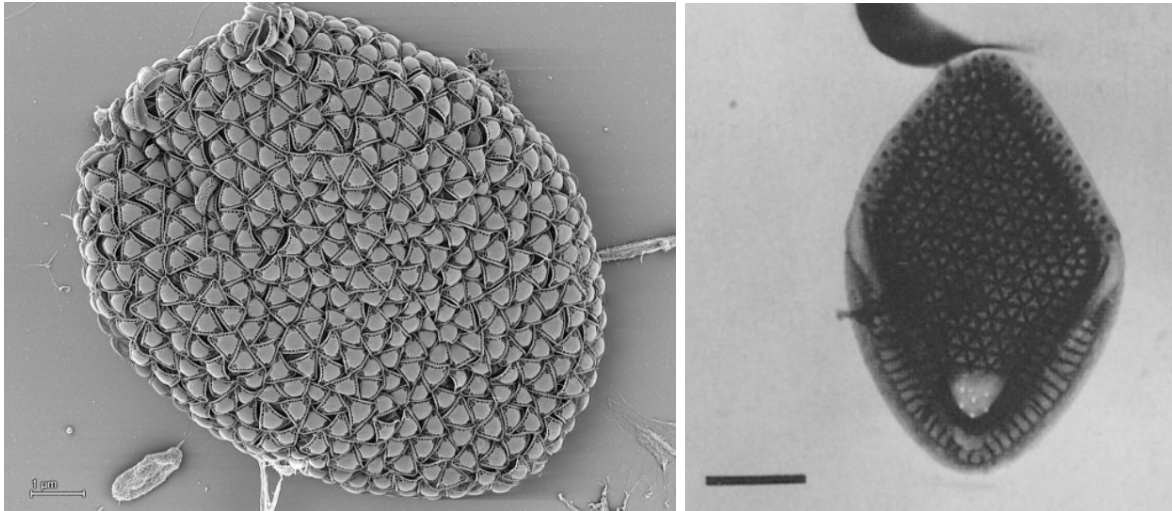
Obr. 11: *Clathrulina elegans* a její využití n-úhellníků ve sférické kostře. Převzato z Young et al. 1995.

Dalším příkladem využití hexagonů v protistech jsou například améby linie *Arcellina* (Obr. 12), u kterých šest vrcholů každého hexagonu určuje rozmístění pórů (Lahr & Lopes, 2009).



Obr. 12: Schránka druhu *Arcella hemisphaerica* (Lahr & Lopes, 2009).

Trojúhelníkovité šupiny můžeme vidět například u řádu *Thaumatomonas*, který je tvoří na povrchu mitochondrií s tubulárními kristami (Obr. 13 vlevo). Jde o bentické bakteriovorní bičíkovce (Mylnikov & Mylnikova, 2012). Příkladem využití trojúhelníku v ploše je *Mallomonas mangofera* var. *reticulata* (Obr. 13 vpravo), kde vzor vzniká pravděpodobně stejně jako šestiúhelníky u druhu *Synura mollispina*, tedy propojením papil.



Obr. 13: Vlevo *Thaumatomonas* sp., převzato z penard.de, vpravo *Mallomonas mangofera* var. *reticulata*, převzato z Hansen, 1996.

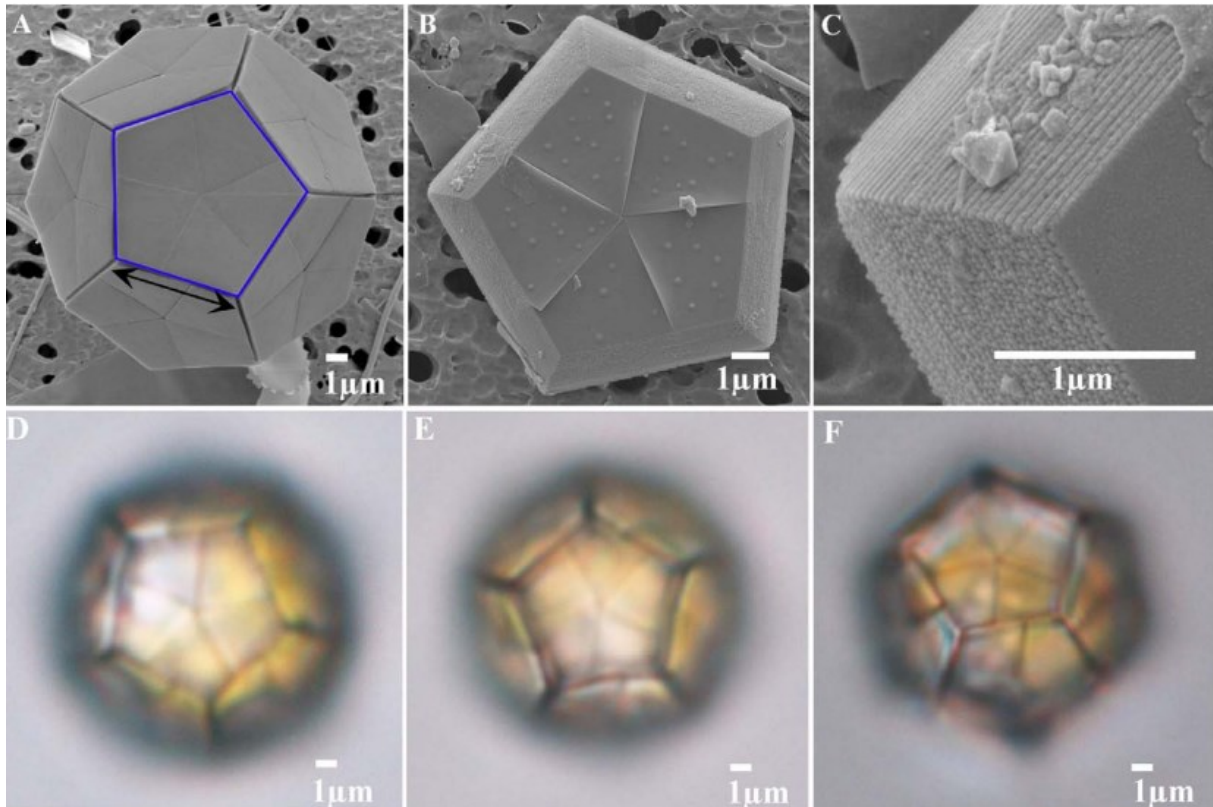
Čtverce, pětiúhelníky i šestiúhelníky se vyskytují na celulósových šupinách mnoha druhů prasinophytních řas. Dokonce může docházet i k syntéze odlišných tvarů a velikostí šupin na různých částech buňky (Harðardóttir et al., 2014; Norris et al., 1978; Obr. 14).



Obr. 14: *Pyramimonas parkeae* a 3 druhy šupin, převzato z Norris et al., 1978.



Velmi pravidelné buňky s pětiúhelníkovými šupinami (pentality) tvoří kokolitky *Braarudosphaera bigelowii* (Obr. 15), které mají velmi dlouhý fosilní záznam táhnoucí se až do svrchní křídy (Brown, 1998). Na rozdíl od 90% kokolitek tedy přežily vymírání na konci křídy (Hagino et al., 2013).

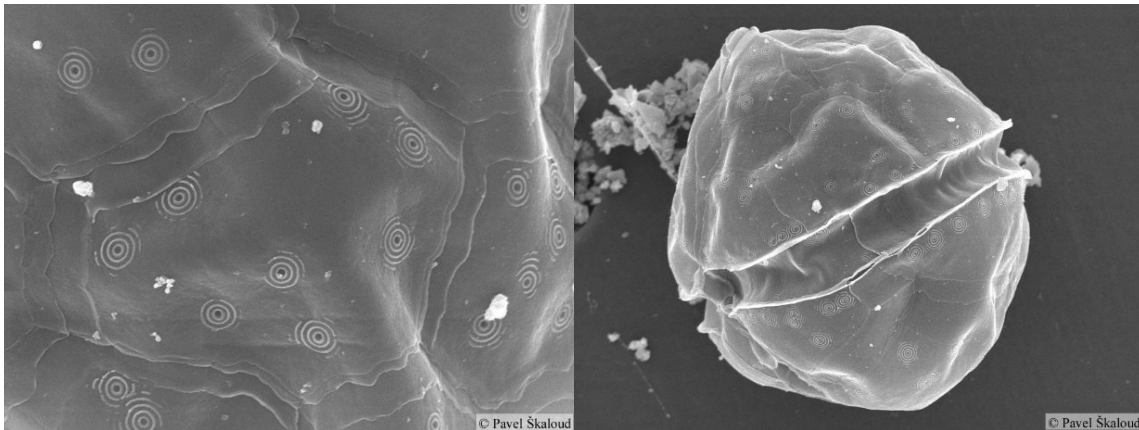


Obr. 15: *Braarudosphaera bigelowii*, A) buňka obklopená 12 pentality, B) detail pentalitu skládající se z pěti lichoběžníkových segmentů, C) vrstevnatá struktura hrany pentalitu, D-F) obrázky ze světelného mikroskopu. Převzato z Hagino et al., 2013.

## 4.2 Kruhy

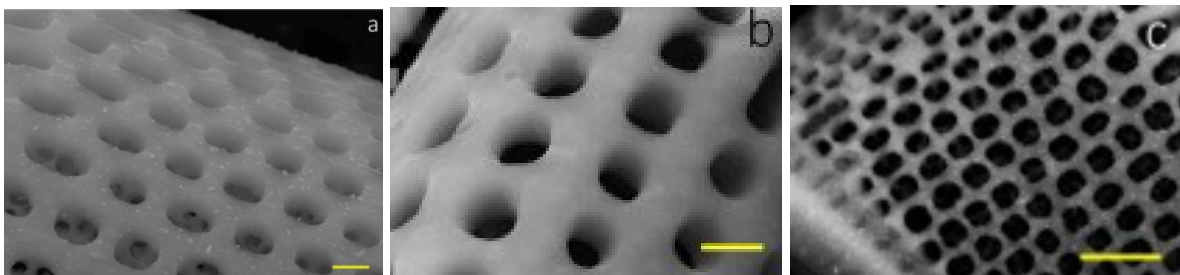
Kruh má nejvyšší možný stupeň symetrie, pokud jde o plochý objekt (Weyl, 2015). Jde o čáru v rovině, která je všude ve stejné vzdálenosti od jediného bodu (Ball, 1999).

Různé póry v povrchových strukturách jsou většinou kulaté, protože to velmi snižuje riziko fraktury pokryvu (Leguillon & Piat, 2008) Známe i případ koncentrických kruhů ohraničující póry obněnky *Pentapharsodinium dalei* (Obr. 16), jejich funkce ale není známá.



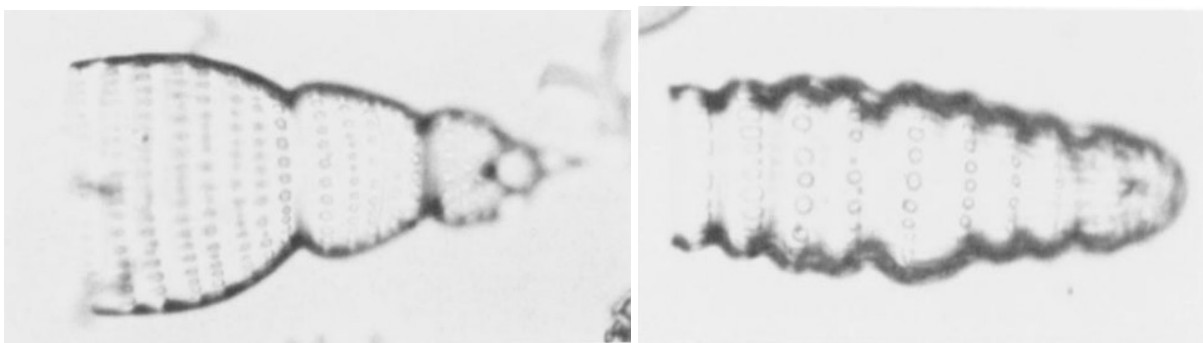
Obr. 16: *Pentapharsodinium dalei* tvořící koncentrické kruhy okolo pórů, převzato z botany.natur.cuni.cz

Porézní a vysoce symetrická struktura rozsivek z nich činí ideální součásti snímacích zařízení a analytických čipů (Villani et al., 2019). Velikost pórů se může pohybovat v rozsahu od jednoho nanometru až po jeden mikrometr (Ferrara et al., 2014; Obr. 17).



Obr. 17: Různé velikosti pórů rozsivek, a) měřítko 100nm, b) měřítko 150nm, c) měřítko 400nm. Převzato z Villani et al., 2019.

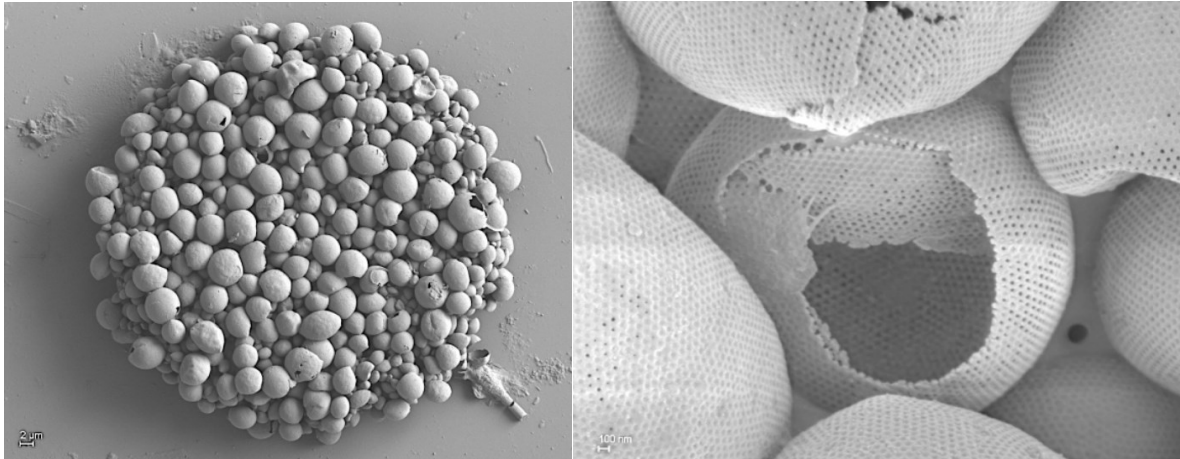
U mřížovců jsou vzorce rozmístění pórů u mnoha linií velmi konzervativní. Například póry u všech Artostrobiidae jsou uspořádány ve výrazných příčných řadách (Obr. 18), rody a druhy se vyznačují rozdíly v rozestupech řádků a pórů v nich (Riedel, 1990).



Obr. 18: Dva druhy čeledi Artostrobiidae a jejich uspořádání pórů, převzato z Riedel 1990.

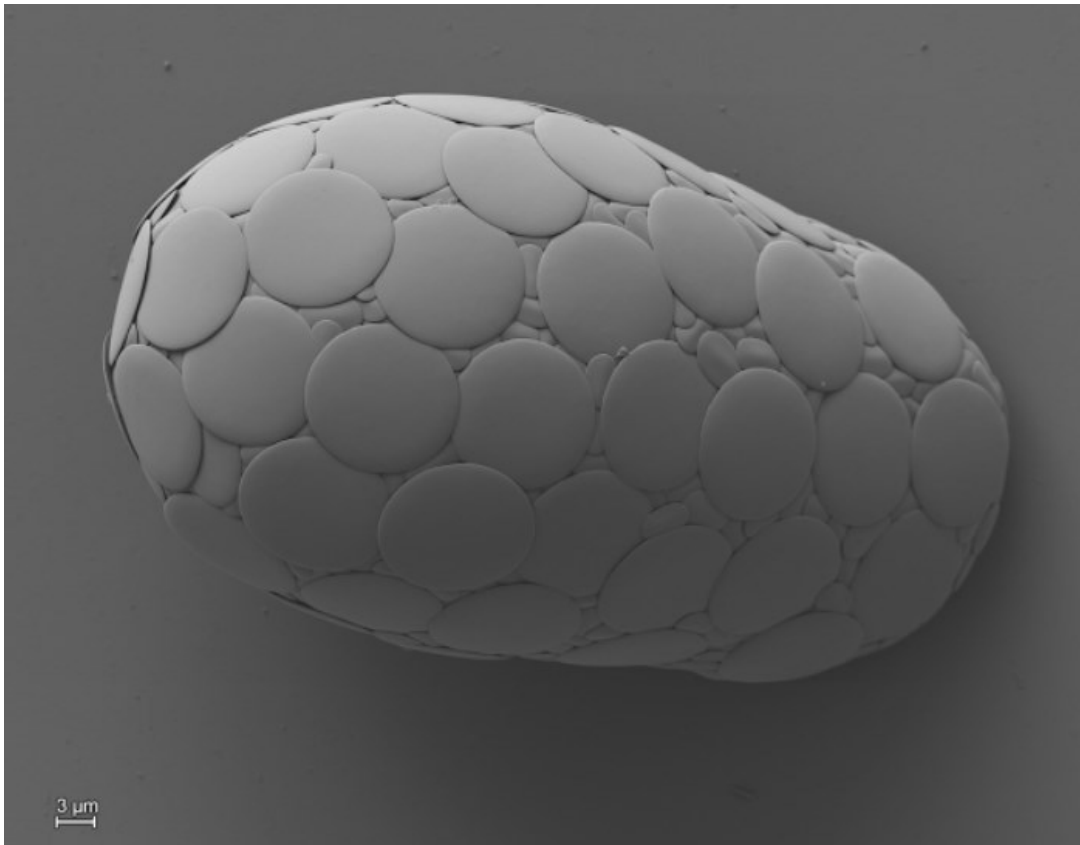


Speciálním případem kulovitých vzorů je améba *Pompholyxophrys punicea*, která má na svém povrchu křemičité perly (Obr. 19). V elektronovém mikroskopu můžeme pozorovat kulaté póry a duté struktury rozbitých perel (Galindo et al., n.d.).



Obr. 19: *Pompholyxophrys punicea*, vpravo detail rozbité perly a kruhovitých pórů v materiálu – převzato z Galindo et al.

Kulaté ale mohou být i šupiny, například u améb rodu *Trinema* (Obr. 20), které se příležitostně přemnoží v teplých stojatých vodách (Munawar & Zafar, 1967).



Obr. 20: *Trinema* sp., převzato z penard.de

## 4.3 Spirály

Hlavními typy spirál, které můžeme pozorovat v mikro i makrosvětě jsou spirály logaritmické a Archimedova spirála (Obr. 21). Logaritmická spirála má křivku všude “podobnou”, takže se liší velikostí, ale ne tvarem. Jak se křivka otáčí o pevný úhel, roste rovnoměrně v měřítku (Ball, 1999). Poloměr Archimedovy spirály roste lineárně s velikostí úhlu (Tripathy & Shima, 2019). Speciálním typem logaritmické spirály je pak Fibonacciho (zlatá) spirála.

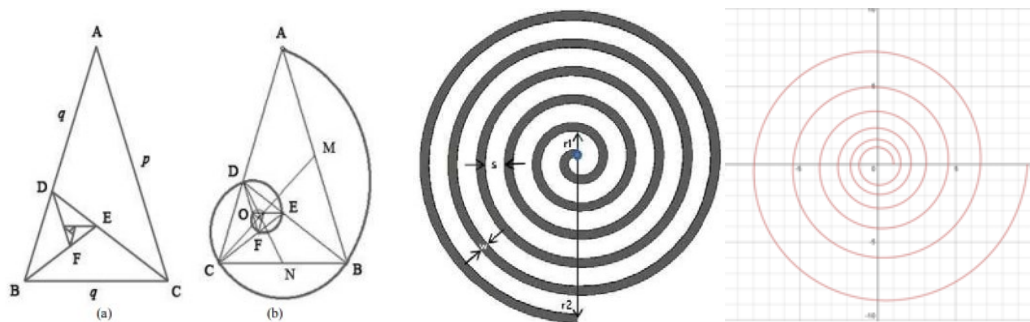
### Zlatý řez a Fibonacciho řada

Fibonacciho řada je velmi jednoduchý koncept vyjádřitelný následujícím funkčním zápisem:

$$f(n) = f(n - 1) + f(n - 2)$$

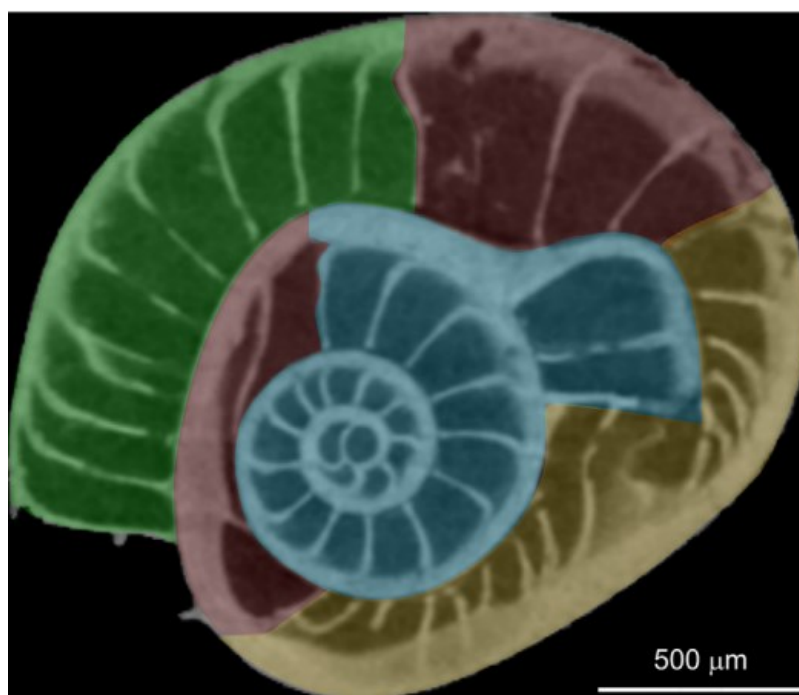
Vyjadřující posloupnost 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13... ve které lze jakýkoliv další člen nalézt součtem dvou předchozích (Horadam, 1961). Limita poměru dvou následujících čísel posloupnosti se blíží k hodnotě 1,618. Tato hodnota je běžně přítomna v poměrech vzdáleností v jednoduchých geometrických obrazcích, jako jsou pětiúhelníky, desetiúhelníky a dvanáctiúhelníky. Jde o poměr známý jako zlatý poměr nebo také zlatý řez (Ilić et al., 2018). Opakuje se v přírodě velmi často a jde o nejestetičtější poměr uplatňující se v mnoha oblastech lidské činnosti jako je fotografie, umění a architektura.

Tato spirála se objevuje v mnoha měřítcích, od tvaru galaxií (He & He, n.d.), přes úhel přirůstání jednotlivých listů na rostlinách (Herrmann, 2018) až po schránky některých zástupců linie Foraminifera (Benedetti, 2014, 2021). Jedná se o speciální případ logaritmické spirály, která se v přírodě objevuje nápadně často. Dalším typem příležitostně nalezitelným v mikrosvětě je archimedova spirála, například ve skupině *Nummulites* (Benedetti, 2021) nebo v rodě *Ammodiscus* (Hohenegger, 2018).



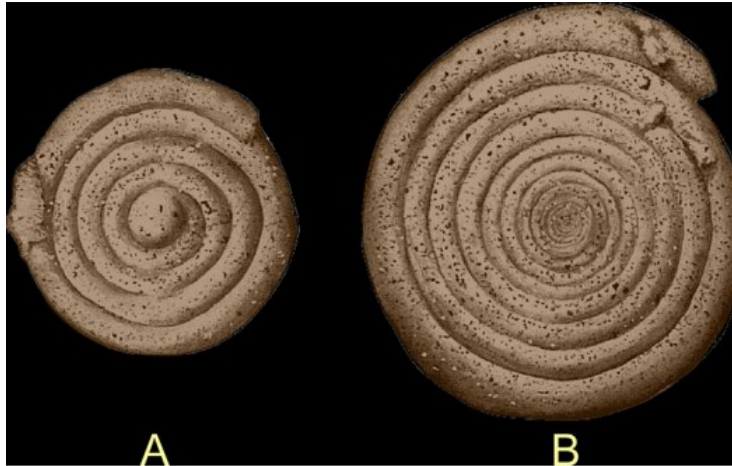
Obr. 21: Zlatý trojúhelník a fibonacciho spirála vytvořená na zlatém trojúhelníku (Akhtaruzzaman & Shafie, 2012), Archimedova spirála (Elkady et al., 2018) a logaritmická spirála (Kowol, 2015).

Ve foraminiferách tvořících komorové oddíly je buněčný růst kombinován se zvětšením objemu komory. V některých případech zůstávají průměry během růstu konstantní a tento typ růstu má za následek stočení typu Archimedovy spirály (Hohenegger, 2018). Pokud dojde k mechanickému narušení schránky foraminifer, často jsou schopny si ho opravit, a vznikají různé nepravidelnosti spirál (Hohenegger, 2009, Obr. 22).



Obr. 22: Virtuální ekvatoriální sekce druhu *Operculina complanata* znázorňující poškození schránky. Modře normálně rostlá schránka, žlutě část ulity donucená urychleně opravit poškození, červeně nepravidelné velikosti spirál a zeleně zase normální přírůstky (převzato z Hohenegger, 2018).

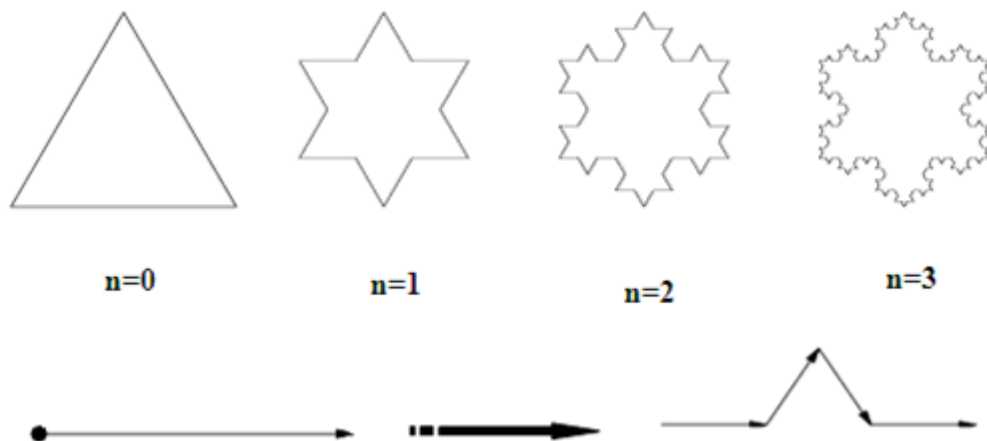
Například *Ammodiscus incertus* tvoří Archimedovu spirálu, jejíž trubice má ale v určitých vývojových stádiích jedince konstantní průměr, v jiných se její průměr zvětšuje (Cushman, 1921; Obr. 23).



Obr. 23: A) *Ammodiscus incertus* ve stádiu gamonta s konstantním průměrem trubice, B) *A. incertus* ve stádiu agamonta se zvětšujícím se průměrem (Cushman, 1921).

## 4.4 Fraktály

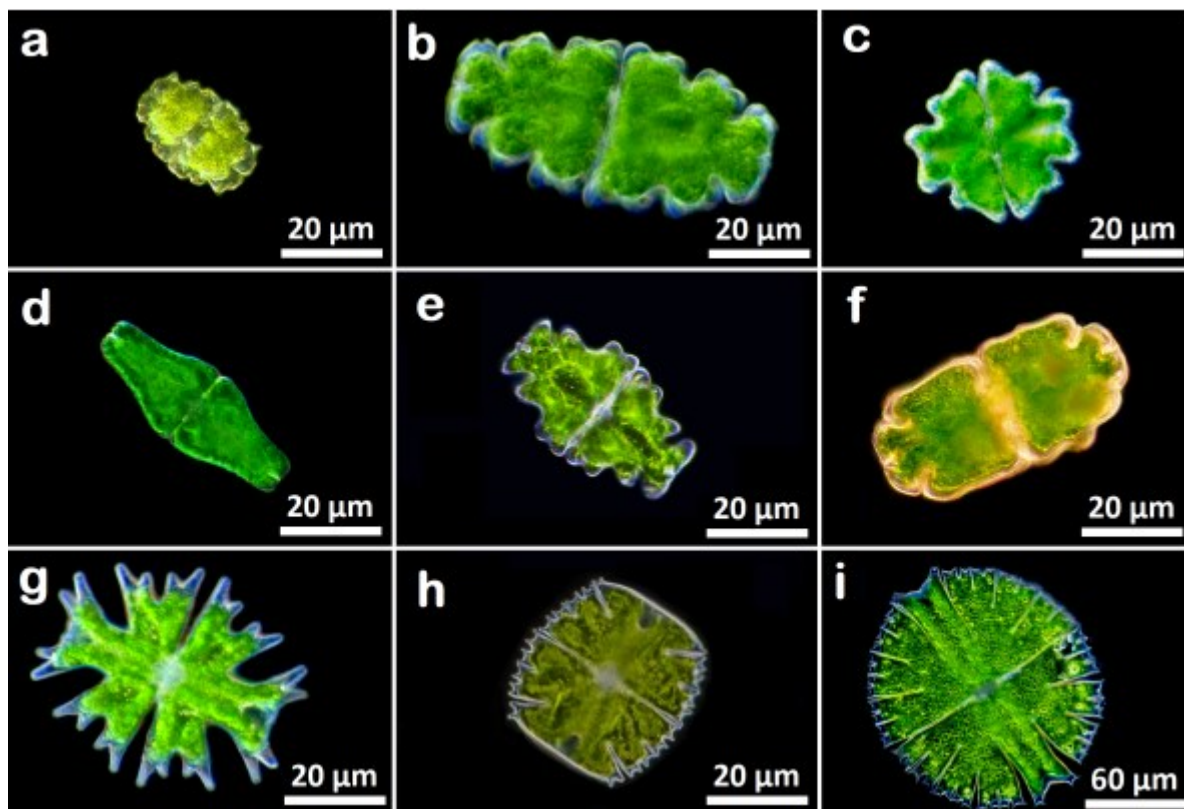
Mnoho přírodních objektů může být matematicky popsáno fraktální geometrií. Narozdíl od euklidovské geometrie dokáže popsat jednoduchým způsobem složitě strukturované útvary (Maximo, 2012). Fraktál je geometrický objekt, který je soběpodobný – jde o opakování určitého charakteristického motivu, který lze pozorovat v jakémkoliv měřítku či rozlišení. Ačkoliv na první pohled vypadá velmi složitě, je ve své podstatě generován opakovaným použitím jednotlivých pravidel (Mandelbrot, 1982). Tvar ale nemusí být přesně identický, aby mohl být klasifikován jako fraktál – hlavní jsou tvary vykazující inherentní a opakující se podobnosti. Nejběžnější příklady fraktálů v přírodě jsou větve stromů, oběhový systém zvířat a žilnatina listů rostlin, radiolaria nebo i říční systémy, mraky nebo krystaly (Stamps, 2002). Jednoduché a elegantní vysvětlení například skládání sněhových vloček nabízí Kochova fraktální teorie (Yassen et al., 2016; Obr. 24), je ale mnoho různých teorií a druhů fraktálů. Příroda se prezentuje poněkud odlišně od toho, co matematici obvykle v geometrii zobrazují. K měření složitých objektů je potřeba přistupovat zcela odlišným způsobem (Mandelbrot, 1982).



Obr 24: Příklad Kochovy fraktální geometrie aplikované například na sněhových vločkách (Yassen et al., 2016).

Matematické analýzy ukázaly, že grafy četností rodů s různým počtem druhů evokují fraktální vzor (Corbet, 1942). Fraktály byly použity ke studiu nelineárních prostorových a časových jevů (Burrough, 1981), ale lze je rozšířit i na abstraktní objekty jako jsou například modely dynamických komplexních systémů (Frontier, 1987). Fraktální povaha taxonomických systémů odhaluje podobnosti s mnoha fenomény od ekonomie až po příbuznost jazyků a mohla by být vodítkem pro správné určení biologické evoluce a sestavení taxonomických stromů (Burlando, 1990).

Většina protist nevykazuje sebepodobnost na neomezeně mnoho úrovních, jako je to u klasických fraktálů. Sebepodobnost se zde hojně objevuje v omezeném počtu úrovní, tento typ tedy označujeme jako redukované fraktály (Pham & Musielak, 2021). Existují nedostatky v sebepodobnosti vyplývající ze skutečnosti, že je nepravděpodobné, aby menší shluk byl přesně stejný jako větší shluk. Sebepodobnost je tedy pouze přibližná (Falconer, 2004). Rozsah přirozených zvětšení těchto struktur je konečný – je tedy nutné poskytovat integrovaný rámec směrem k definici fraktálů použitelných na tyto přírodní struktury (Schroeder, 2009). Řasy mohou být organizovány podle této fraktální dimenze, což může být velmi užitečné při jejich klasifikaci (Obr. 25). Dá se tak zjistit podobnost úrovně složitosti jednotlivých druhů a stupeň jejich podobnosti s druhy jinými (Pham & Musielak, 2021).



Obr. 25: Řasy třídy Zygnematophyceae a jejich fraktální dimenze (Fd) určující jejich podobnost - (a) *Euastrum bidentatum* Fd = 1.8408, (b) *Euastrum oblongum* Fd = 1.8598, (c) *Euastrum verrucosum* Fd = 1.8739, (d) *Euastrum ansatum* Fd = 1.8801, (e) *Euastrum humerosum* Fd = 1.8907, (f) *Euastrum crassum* Fd = 1.8948, (g) *Micrasterias americana* Fd = 1.8117, (h) *Micrasterias truncata* Fd = 1.8703, (i) *Micrasterias rotata* Fd = 1.8749

## 5 Závěr

Příroda funguje velmi uspořádaně a vzory jsou všude kolem nás. S rozvojem techniky, zobrazovacích metod a laboratorních postupů stále více zjišťujeme, že řád přírody je značně předvídatelný a správnou matematickou formulací vypočítatelný. Potřebujeme znát podstatu samoorganizace nanovzorů, abychom mohli zlepšovat elektrotechnické a stavební hmoty. V nanosvětě, mikrosvětě i makrosvětě je mnoho vzorů zcela analogických, ale je nejasné, zda mají stejné sebeorganizační mechanismy vzniku. Stejně vzory, které se uplatňují ať už na ultrastrukturu nebo v chování mikroorganismů můžeme sledovat i v makrosvětě, a to rozhodně ne jen u zvířat. Lidská činnost také vykazuje vysoký stupeň vzorovanosti. Ať už jde o ekonomický trh nebo sociologické chování, vše funguje podle určitých pravidel a algoritmů, které buď jsme, nebo pravděpodobně brzy budeme schopni vypočítat.

Formace mikrovzoru je ve většině případů výsledkem fyzikální nebo chemické reakce, která nastává i bez přispění daného organismu. Protista mají pravděpodobně mechanismy, které jsou schopné proces do určité míry manipulovat. Povrchové struktury vznikají nejčastěji za účelem zvýhodnění organismu v jeho přirozeném prostředí, z nichž nejčastější jsou například vylepšení obrany před predátorem nebo usnadnění mobility ve vodním sloupci. Výše zmíněná rešerše poukazuje na velkou diverzitu vzorů v mikrosvětě, jejichž funkce je často neznámá nebo přehlížená. Ze střípků dat, které byly relevantní a interpretovatelné je velmi pravděpodobné, že se jedná především o funkční adaptace.

Vzory vznikají díky nějaké nestabilitě, běžně při narušení symetrie a charakteristické vlnové délce, která určuje konkrétní velikost rysů vzoru. Nestabilitu může představovat všechno možné, od ohřáté tekutiny tvořící proudění, přes morfogeny reagující v embryu, které aktivují mechanismy jeho diferenciaci, až po pád akcií na burze. U protist může jít například o rozdíl mezi pH vaku nesoucí křemičitý materiál a venkovního prostředí, který ho donutí polymerizovat. Mnoho šupin chrysomád prochází nějakou formou reakčně – difuzní reakce, která má za následek Turingovy vzory. Tato nestabilita ale nemůže být příliš jednostranná, spontánní vzor se objevuje při nějakých protichůdných tendencích. Nejvhodnějším příkladem je kompromis mezi reakcí a difuzí u Turingových vzorů. Vzor se objevuje pouze, když soupeřící síly působí v takové míře, kdy odstraní uniformitu, ale nemohou zcela vyvolat chaos.

Existuje mnoho matematických pravidel, kterými se dá vzor popsat a vygenerovat množství dat, které usnadňují jeho další zkoumání. Mnoho vzorů protist můžeme popsat pomocí redukovaných fraktálů a určit tím jejich stupeň podobnosti, což by mohlo mít za následek zjednodušení a zpřesnění mechanismu výzkumu jejich taxonomie.



## 6 Zdroje

- Adl, S. M., Simpson, A. G. B., Lane, C. E., Lukeš, J., Bass, D., Bowser, S. S., Brown, M. W., Burki, F., Dunthorn, M., Hampl, V., Heiss, A., Hoppenrath, M., Lara, E., Gall, L. le, Lynn, D. H., McManus, H., Mitchell, E. A. D., Mozley-Stanridge, S. E., Parfrey, L. W., ... Spiegel, F. W. (2012). The revised classification of eukaryotes. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 59(5), 429–514.
- Afanasieva, M. S. (2006). Radiolarian skeletons: Formation and morphology of skeletal shells. *Paleontological Journal*, 40(5), 476–489.
- Akhtaruzzaman, Md., & Shafie, A. A. (2012). Geometrical Substantiation of Phi, the Golden Ratio and the Baroque of Nature, Architecture, Design and Engineering. *International Journal of Arts*, 1(1), 1–22.
- Alga, C., Petersenii Author, S., & Siver, P. A. (1988). A New Forma of the Common. In *Source: Transactions of the American Microscopical Society* (Vol. 107, Issue 4).
- Assenheimer, M. & Steinberg, V. (1994). Transition between spiral and target states in Rayleigh – Bénard convection, *Nature* (Vol. 367).
- Ball, P. (1999). *The self-made tapestry : pattern formation in nature*. Oxford University Press.
- Ball, P. (2015). Forging patterns and making waves from biology to geology: A commentary on Turing (1952) ‘The chemical basis of morphogenesis. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 370, Issue 1666). Royal Society of London.
- Becker, B., Marin, B., & Melkonian, M. (1994). Structure, composition, and biogenesis of prasinophyte cell coverings. In *Protoplasma* (Vol. 181). Springer-Verlag.
- Bel, B. N., Belousov, L. v, & Zraisky, A. G. (1987). Model of Pattern Formation in Epithelial Morphogenesis, *J. Theor. Biol.* (Vol. 129).
- Benedetti, A. (2014). Spiral growth in Nephrolepidina : evidence of “golden selection” . *Paleobiology*, 40(2), 151–161.
- Benedetti, A. (2021). Spira mirabilis in Heterostegina: evolutionary and ecological perspectives. *Historical Biology*, 33(10), 2171–2181.
- Berman, A., Hanson, J., Leiserowitz, L., Koetzle, T. F., Weiner, S., & Addadi, B. (1993). Biological Control of Crystal Texture: A Widespread Strategy for Adapting Crystalline Properties to Function, *Science* (Vol. 259).

- Boltovskoy, D., Afanasieva, M. S., Amon, E. O., Agarkov, Y. v, & Boltovskoy, D. S. (2005). Radiolarians in the Geological Record. *Paleontological Journal* (Vol. 39).
- Bot, N. J., & Siver, P. A. (1987). The distribution and variation of *Synura* species (Chrysophyceae) in Connecticut, USA. *Nord. J. Bot.* 7: 107-116. Copenhagen.
- Bourne, G. H. (Geoffrey H., Danielli, J. F. (James F., & Jeon, K. W. (1983). *International review of cytology* (Vol. 82). Academic Press.
- Budrene, E. O., & Berg, H. C. (1995). Dynamics of formation of symmetrical patterns by chemotactic bacteria, *Nature* (Vol. 376).
- Burlando, B. (1990). The Fractal Dimension of Taxonomic Systems. In *J. theor. Biol* (Vol. 146).
- Caro, T., Izzo, A., Reiner, R. C., Walker, H., & Stankowich, T. (2014). The function of zebra stripes. *Nature Communications*, 5:3535.
- Chan, W. S., Kwok, A. C. M., & Wong, J. T. Y. (2019). Knockdown of dinoflagellate cellulose synthase CesA1 resulted in malformed intracellular cellulosic thecal plates and severely impeded cyst-to-swarmers transition. *Frontiers in Microbiology* (Vol. 10, Issue 546).
- Demadis, K. D. (2018). Biosilica: Structure, function, science, technology, and inspiration. In *American Mineralogist* (Vol. 103, Issue 7, pp. 1009–1010). Walter de Gruyter GmbH.
- Durkin, C. A., Mock, T., & Armbrust, E. V. (2009). Chitin in diatoms and its association with the cell wall. *Eukaryotic Cell*, 8(7), 1038–1050.
- Edwards And, W. S., & Fauve, S. (1994). Patterns and quasi-patterns in the Faraday experiment, *J. Fluid Mech* (Vol. 278, pp. 123-148).
- Elkady, H. M., Abdullah, H. H., & Darwish, S. M. (2018). A Novel UWB Quadrifilar Planar Spiral Antenna, *Progress In Electromagnetics Research Symposium (Piers – Toyama)*.
- Fennessy, S. (2019). A Journey of Giraffe A practical guide to wild giraffe translocations, *Giraffe Conservation Foundation*.
- Ferrara, M. A., Dardano, P., de Stefano, L., Rea, I., Coppola, G., Rendina, I., Congestri, R., Antonucci, A., de Stefano, M., & de Tommasi, E. (2014). Optical properties of diatom nanostructured biosilica in *Arachnoidiscus* sp: Micro-optics from mother nature. *PLoS ONE* (Vol. 9, Issue 7).

- Galindo, L. J., Torruella, G., Moreira, D., Eglit, Y., Simpson, A. G. B., Völcker, E., Clauß, S., & López-García, P. (n.d.). Supplementary material corresponding to the manuscript entitled: Combined cultivation and single-cell approaches to the phylogenomics of the nucleariid amoebae, close relatives of Fungi.
- Gavrilova, O., Nogina, N., & Voloshko, L. (2005). Scale structures and growth characteristics of *Synura petersenii* (Synurophyceae) under different pH conditions. *Nova Hedwigia Beiheft*.
- Gierer, A., & Meinhardt, H. (1972). A Theory of Biological Pattern Formation. In *Kybernetik* (Vol. 12). Springer-Verlag.
- Golovin, A. A., & Nepomnyashchy, A. A. (2004). Self-Assembly, Pattern Formation and Growth Phenomena in Nano-Systems (1-54).
- Gouze, B., Cambedouzou, J., Parrès-Maynadié, S., & Rébiscoul, D. (2014). How hexagonal mesoporous silica evolves in water on short and long term: Role of pore size and silica wall porosity. *Microporous and Mesoporous Materials* (Vol. 183, pp. 168–176).
- Haeckel, E., Briedbach, O., Eibl-Eibesfeldt, I., & Hartmann, R. P. (1998). *Art forms in nature: The prints of Ernst Haeckel*. Prestel.
- Hagino, K., Onuma, R., Kawachi, M., & Horiguchi, T. (2013). Discovery of an endosymbiotic nitrogen-fixing cyanobacterium UCYN-A in *Braarudosphaera bigelowii* (Prymnesiophyceae). *PLoS ONE* (Vol. 8, Issue 12).
- Hansen, P. (1996). Silica-scaled chrysophyceae and synurophyceae from madagascar. *Archiv Fur Protistenkunde*, (Vol. 147, Issue 2, pp. 145–172).
- Harðardóttir, S., Lundholm, N., Moestrup, Ø., & Nielsen, T. G. (2014). Description of *Pyramimonas diskoicola* sp. nov. and the importance of the flagellate *Pyramimonas* (Prasinophyceae) in Greenland sea ice during the winter–spring transition. *Polar Biology* (Vol. 37, Issue 10, pp. 1479–1494).
- Harting, P. (1872). Recherches de morphologie synthétique sur la production artificielle de quelques formations calcaires organiques.
- He, H., & He, J. (n.d.). Galaxy Anatomy: “Darwin Spirals.”, *PACS* Nos.: 02.60.Lj, 98.52.Nr
- Hecky, R. E., Mopper, K., Kilham, P., & Degens, E. T. (1973). The Amino Acid and Sugar Composition of Diatom Cell-Walls, *Marine biology* (Vol.19, pp. 323-331).
- Herrmann, B. (2018). Visibility in a pure model of golden spiral phyllotaxis. *Mathematical Biosciences* (Vol. 301, pp. 185–189).

- Hohenegger, J. (2018). Foraminiferal growth and test development. *Earth-Science Reviews* (Vol. 185, pp. 140–162).
- Horadam, A. F. (1961). A Generalized Fibonacci Sequence. *The American Mathematical Monthly* (Vol. 68, Issue 5, pp. 455–459).
- Ilić, I., Stefanović, M., & Sadiković, D. (2018). Mathematical determination in nature – The Golden Ratio, *Acta Medica Mediae* (Vol. 56, Issue 3, pp. 124-129).
- Israel, G. (1988). On the Contribution of Volterra and Lotka to the Development of Modern Biomathematics. In *Philosophy of the Life Sciences* (Vol. 10, Issue 1).
- Joets, A., & Ribotta, R. (1986). Hydrodynamic transitions to chaos in the convection of an anisotropic fluid. *Journal de Physique Paris*, (Vol. 47, Issue 4, pp. 595–606).
- Khabakov, A. v., Strelkov, A. A., & Lipman, R. K. (1959). Subclass Radiolaria or Radiolarians. *Fundamentals of Paleontology: General Part, Protists* (pp. 369–482).
- Kowol, E. (2015). The international baccalaureate internal assessment in mathematics sl., *ZESPÓŁ SZKÓŁOGÓLNOKSZTAŁCĄCYCH NR 10—I LO*, Gliwice, Poland.
- Kudryavtsev, A. (1999). Description of *Cochliopodium larifeili* n. sp. (Lobosea, Himatistenida), an amoeba with peculiar scalestructure, and notes on the diagnosis of the genus *Cochliopodium* (Hertwig and Lesser, 1874) Bark, 1973, *Protistology* (Vol. 1, Issue 2, pp. 66-71).
- Lahr, D. J. G., & Lopes, S. G. B. C. (2009). Evaluating the Taxonomic Identity in Four Species of the Lobose Testate Amoebae Genus *Arcella* Ehrenberg, 1832. In *Acta Protozool* (Vol. 48).
- Landge, A. N., Jordan, B. M., Diego, X., & Müller, P. (2020). Pattern formation mechanisms of self-organizing reaction-diffusion systems. In *Developmental Biology* (Vol. 460, Issue 1, pp. 2–11).
- Lane, T. H., & Burns, S. A. (1996). Silica, silicon and silicones ... unraveling the mystery. In M. Potter & N. R. Rose (Eds.), *Immunology of Silicones* (Vol. 210, pp. 3-12). Berlin 33: Springer-Verlag Berlin.
- Leguillon, D., & Piat, R. (2008). Fracture of porous materials - Influence of the pore size. *Engineering Fracture Mechanics*, (Vol. 75, Issue 7, pp. 1840–1853).
- Lotka, A. (1910). Zur Theorie der periodischen Reaktionen (508 – 511).
- Lotka, A. (1920). PED oscillations derived from the law of mass action. *Undamped Oscillations, etc.* (1595 – 1599).

- Lubenow, C. (2011). The adaptive function of leaf fenestrations in *Monstera* spp. (Araceae): a look at water, wind, and herbivory.
- Maini, P. K. (2004). Using mathematical models to help understand biological pattern formation. *Comptes Rendus – Biologies* (Vol. 327, Issue 3, pp. 225–234).
- Mandelbrot, B. B. (1982), Fractals and the Geometry of Nature. *Encyclopedia Britannica* (pp. 169 – 181).
- Marron, A. O., Ratcliffe, S., Wheeler, G. L., Goldstein, R. E., King, N., Not, F., de Vargas, C., & Richter, D. J. (2016). The evolution of silicon transport in eukaryotes. *Molecular Biology and Evolution*, (Vol. 33, Issue 12, pp. 3226–3248).
- Masuda, H. & Fukuda, K. (1995). Ordered Metal Nanohole Arrays Made by a Two-Step Replication of Honeycomb Structures of Anodic Alumina, *Science* (Vol. 268).
- Maximo, L. (2012). Foundations of Measurement Fractal Theory for the Fracture Mechanics. *Applied Fracture Mechanics* (pp. 19 – 66).
- Mennin, S. (2010). Self-organisation, integration and curriculum in the complex world of medical education. In *Medical Education* (Vol. 44, Issue 1, pp. 20–30).
- Milligan, A. J., & Morel, F. M. (2001). A proton Buffering Role for Silica in Diatoms. *Acta Crystallogr. D. Biol. Crystallogr* (Vol. 276).
- Mishra, M., Arukha, A. P., Bashir, T., Yadav, D., & Prasad, G. B. K. S. (2017). All new faces of diatoms: Potential source of nanomaterials and beyond. *Frontiers in Microbiology* (Vol. 8, Article 1239).
- Mordukhai-Boltovskoy, D. D. (1936). Geometry of Radiolarians (pp. 1–91): Uch. Zap. Rostov. Univ., No. 8
- Mulisch, M. (1991). Cell and Tissue Research Ultrastructure and membrane topography of special ciliary organelles in the ciliate *Eufolliculina uhligi* (Protozoa). In *Cell Tissue Research* (Vol. 265).
- Mulisch, M., & Hausmann, K. (1989). Localization of chitin on ultrathin sections of cysts of two ciliated protozoa, *Blepharisma undulans* and *Pseudomicrothorax dubius*, using colloidal gold conjugated wheat germ agglutinin, *Protoplasma* (Vol. 152, pp. 77-86).
- Munawar, M., & Zafar, A. R. (1967). A Preliminary Study of Vertical Movement of *Eudorina elegans* and *Trinema lineare* during a Bloom caused by them (pp. 140 – 148).

- Mylnikov, A. P., & Mylnikova, Z. M. (2012). Ultrastructure of the amoeboid flagellate *Thaumatomonas zhukovi* Mylnikov et Mylnikov (Thaumatomonadida (Shirkina) Karpov, 1990). *Inland Water Biology* (Vol. 5, Issue 1, pp. 29–35).
- Nakamasu, A., Kanbe, A., & Kondo, S. (2009). Interactions between zebrafish pigment cells responsible for the generation of Turing patterns, *Journal of Theoretical Biology* (Vol. 106, Issue 21, pp. 8429 – 8434).
- Němcová, Y., Neustupa, J., Kviderová, J., & Řezáčová-Škaloudová, M. (2010). Morphological plasticity of silica scales of *Synura echinulata* (Synurophyceae) in crossed gradients of light and temperature – a geometric morphometric approach. *Nova Hedwigia, Beihefte* (Vol. 136, pp. 21–32).
- Niklas, K. J. (2004). The Cell Walls that Bind the Tree of Life, *BioScience* (Vol. 54, Issue 9, pp. 831 – 841).
- Norris, R. E., Pienaar, R. N., & Harbor, F. (1978). Comparative fine-structural studies on five marine species of *Pyramimonas* (Chlorophyta, Prasinophyceae). In *Phycologia* (Vol. 17, Issue 1).
- Oliver, S., Kiperman, A., Coombs, N., Lough A., Ozin, G.A. (1995). Lamellar aluminophosphates with surface patterns that mimic diatom and radiolarian microskeletons. *Nature* (Vol. 378).
- Padisak, J., Soroczki-Pinter, E., & Rezner, Z. (2003). Sinking properties of some phytoplankton shapes and the relation of form resistance to morphological diversity of plankton-an experimental study, *Hydrobiologia* (Vol. 500, pp. 243 - 257).
- Pasteur, G. (1982). A classificatory review of mimicry systems. *Annual Reviews Ecol. Syst.* (Vol. 13, pp. 169 – 199).
- Penny, J. H. J. (1983). Nectar guide colour contrast: A possible relationship with pollination strategy, *New phytol.* (Vol. 95, pp. 707-721).
- Pesch, W., & Kramer, L. (1996). General Mathematical Description of Pattern-Forming Instabilities. In A. Buka & L. Kramer (Eds.), *Pattern Formation in Liquid Crystals* (pp. 69–90). Springer.
- Pham, D. T., & Musielak, Z. E. (2021). Spectra of Reduced Fractals and their Applications in Biology.
- Preisig, H. R. (1994). Siliceous structures and silicification in flagellated protists. In *Protoplasma* (Vol. 181).

- Rakkhumkaew, N., Kawasaki, T., Fujie, M., & Yamada, T. (2018). Chitin synthesis by *Chlorella* cells infected by chloroviruses: Enhancement by adopting a slow-growing virus and treatment with aphidicolin. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, (Vol.125, Issue 3, pp. 311–315).
- Raven, J. A., & Giordano, M. (2009). Biomineralization by photosynthetic organisms: Evidence of coevolution of the organisms and their environment? *Geobiology*, (Vol. 7, Issue 2, pp. 140–154).
- Riedel, W. R. (1990). Quantitative Description of Pore Patterns in Radiolarians. *Micropaleontology* (Vol. 36, Issue 2).
- Rogers, J. L., Schatz, M. F., Bougie, J. L., & Swift, J. B. (2000). Rayleigh-Bénard Convection in a Vertically Oscillated Fluid Layer. *Physical Review Letters* (Vol. 84, Issue 1).
- Rusconi, R., & Stocker, R. (2015). Microbes in flow. In *Current Opinion in Microbiology* (Vol. 25, pp. 1–8).
- Sandgren, C. D. & Hall, S. A. (1996). Siliceous scale production in chrysophyte and sinuophyte algae, *J. Phycol* (pp. 675 – 692).
- Saranathan, V., Osuji, C. O., Mochrie, S. G. J., Noh, H., Narayanan, S., Sandy, A., Dufresne, E. R., & Prum, R. O. (2010). Structure, function, and self-assembly of single network gyroid (I4 1 32) photonic crystals in butterfly wing scales. *PNAS* (Vol. 107, Issue 26, 11676 – 11681).
- Short, M. B., Brantingham, P. J., Bertozzi, A. L., & Titad, G. E. (2010). Dissipation and displacement of hotspots in reaction-diffusion models of crime. *PNAS* (Vol. 107, Issue 9, pp. 3961–3965).
- Sparrow, E. M., Schmidt, R. R., Ramsey, J. W. (1978). Experiments on the Role of Natural Convection in the Melting of Solids. *Journal of Heat Transfer* (vol. 100)
- Stamps, A. E. (2002). Fractals, skylines, nature and beauty. *Landscape and Urban Planning* (Vol. 60).
- Steinfeld, L., Vafaei, A., Rösner, J., & Merzendorfer, H. (2019). Chitin prevalence and function in bacteria, fungi and protists. *Advances in Experimental Medicine and Biology* (Vol. 1142, pp. 19–59). Springer New York LLC.
- Swindale, N. v. (1980). A model for the formation of ocular dominance stripes. *Proceedings of the Royal Society of London - Biological Sciences*. (Vol. 208, Issue 1171, pp. 243–264).

- Tampieri, A., Iafisco, M., Sandri, M., Panseri, S., Cunha, C., Sprio, S., Savini, E., Uhlarz, M., & Herrmannsdörfer, T. (2014). Magnetic bioinspired hybrid nanostructured collagen-hydroxyapatite scaffolds supporting cell proliferation and tuning regenerative process. *ACS Applied Materials and Interfaces* (Vol. 6, Issue 18, pp. 15697–15707).
- Thompson, W. D. (1942). *On Growth and Form*. Cambridge Univ. Press.
- Tripathy, T., & Shima, T. (2019). Archimedean spiral-based intercept angle guidance. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* (Vol. 42, Issue 5, pp. 1105–1115).
- Turing, A. M. (1952). The chemical basis of morphogenesis, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* (Vol. 237, No. 641, pp. 37-72).
- Vargas, C. de, Aubry, M., Probert, I., & Young, J. (2007). Origin and Evolution of Coccolithophores: From Coastal Hunters to Oceanic Farmers. *Evolution of Primary Producers in the Sea* (pp. 251 – 286).
- Villani, M., Onesto, V., Coluccio, M. L., Valpapuram, I., Majewska, R., Alabastri, A., Battista, E., Schirato, A., Calestani, D., Coppedé, N., Zappettini, A., Amato, F., di Fabrizio, E., & Gentile, F. (2019). Transforming diatomaceous earth into sensing devices by surface modification with gold nanoparticles. *Micro and Nano Engineering* (Vol. 2, pp. 29–34).
- Dassow, P., Díaz-Rosas, F., Bendif, E. M., Gaitán-Espitia, J.-D., Mella-Flores, D., Rokitta, S., John, U., & Torres, R. (2017). Overcalcified forms of the coccolithophore *Emiliania huxleyi* in high CO<sub>2</sub> waters are not pre-adapted to ocean acidification, *Biogeosciences*.
- Werker, E. Trichome Diversity and Development (2000). *Advances in Botanical Research* (Vol. 31, pp. 1-30).
- Yassen, M. T., Hussan, M. R., Abdulkarim, H., Ali, J. K., Hussan, M. R., & Hammas, H. A. (2016). A Compact Dual-band Antenna with Fractal Slot Annular Ring and Defected Ground Structure, Technical Report, University of Technology, Iraq.
- Zeytounian, A. (2009). The Bénard (1900, 1901) Convection Problem, Heated from Below (pp. 85-130).