

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Studijní obor: Geologie (B1201)
Studijní program: BGEOL (1201R004)



VLADIMÍR SUCHÁNEK

Europa a její význam pro exobiologii - život v ledu

Europa and its importance for exobiology - life in ice

Bakalářská práce

Vedoucí práce: prof. RNDr. JAN JEHLIČKA, CSc.

Praha, 2013

Prohlášení

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

V Praze 5. 8. 2013

Podpis:

Abstrakt

Obecně vzato lze říct, že pro život podobný tomu, co známe na Zemi, je nutno splňovat tři základní předpoklady. Na povrchu nebo pod povrchem planety či měsíce se musí nacházet kapalná voda, základní biogenní prvky a neméně důležitý zdroj energie. Pokud jsou tyto požadavky alespoň částečně splněny, lze dané místo ve vesmíru označit za potenciální zdroj života.

Tato odborná práce se zabývá možným vznikem života na jednom z Jupiterových měsíců, nesoucí název Europa. Samotná práce je rozdělena do čtyř základních kapitol, kde se první tři kapitoly zabývají Europou, jako místem vhodným pro život. Čtvrtá kapitola se pak zaměřuje na budoucí výzkum měsíce. Pro vytvoření práce byla použita data získaná z kosmických družic Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1 , Voyager 2 a Galileo.

Abstract

Generally we can say, that for life similar to the life on the Earth it is necessary to meet three basic prerequisites. On the surface or below the surface of the planet or the moon there must be liquid water, basic biogenic elements and no less important source of energy. If these requirements are at least partially met, the given place in the universe can be described as a potential source of life.

This scientific work is dealing with the possible origins of life on one of Jupiter's moons, named Europa. The thesis is divided into four chapters, where the first three chapters deal with Europa as a place suitable for life. The fourth chapter is focused on the future research of the moon. This work is based on the data obtained from satellites Pioneer 10, Pioneer 11, Voyager 1, Voyager 2 and Galileo.

Obsah

1	ÚVOD.....	9
2	CHARAKTERISTIKA EUROPY.....	10
2.1	Složení Nitra Evropy.....	11
2.2	Slapový ohřev.....	12
2.3	Složení povrchu Evropy.....	13
2.4	Povrchové útvary.....	14
2.4.1	Dvojité hřebeny.....	15
2.4.2	Pásky.....	15
2.4.3	Tektonika pásů a hřebenů.....	16
2.4.4	Cykloidní praskliny.....	16
2.4.5	Putování pólů.....	17
2.4.6	Chaotické regiony.....	18
2.4.7	Lentikulární oblasti.....	18
2.4.8	Vznik chaotických a lentikulárních oblastí.....	19
2.4.9	Impaktní krátery.....	19
3	OCEÁN NA EUROPE.....	21
3.1	Ledová vrstva Evropy.....	21
3.1.1	Greenbergova teorie tenké krusty.....	21
3.1.2	Pappalardova teorie silné krusty.....	22
3.1.3	Tenká vs. silná ledová křusta.....	22
3.2	Složení oceánu.....	24
3.2.1	Salinita.....	24
3.2.2	Teplota oceánu.....	26
3.3	Mořské dno.....	27
3.4	Podmořský vulkanismus a hydrotermální činnost.....	28
4	EXISTENCE ŽIVOTA NA EUROPE.....	31
4.1	Základní podmínky.....	31
4.1.1	Prvkové složení.....	31
4.1.2	Salinita a pH.....	31
4.1.3	Tlak.....	31
4.1.4	Teplota.....	32
4.2	Minulost Evropy.....	32
4.3	Zdroje energie pro život.....	33
4.3.1	Energie ze dna oceánu.....	33
4.3.2	Radiace.....	34
4.3.3	Alternativní zdroje energie.....	35
4.3.3.1	Magnetotrofie.....	36
4.3.3.2	Termotrofie.....	36
4.3.3.3	Kinetotrofie.....	36
4.3.3.4	Osmotrofie.....	36
4.3.3.5	Temná fotosyntéza.....	37
4.4	Prostředí života na Evrope.....	37
4.4.1	Povrchová vrstva.....	37
4.4.2	Rozhraní mezi ledovou křustou a oceánem.....	38
4.4.3	Horní patra oceánu (pelagiál).....	39

4.4.4	Dno oceánu.....	39
5	EUROPA A JEJÍ VÝZKUM V BUDOUCNOSTI.....	40
5.1	Europa orbiter.....	40
5.2	JIMO (Jupiter icy moons arbiter).....	40
5.3	Jovian Europa orbiter.....	40
5.4	Europa Lander.....	41
5.5	Europa ocean explorer.....	41
6	ZÁVĚR.....	42
7	SEZNAM LITERATURY.....	43

Seznam obrázků

Obr. 1. Zadní polokoule Europy (NASA/JPL/Galileo, 1997).....	10
Obr. 2. Nitro Europy (Petrásek et al., 2009).....	12
Obr. 3. Dvojitý hřeben (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000)	15
Obr. 5. Klínové pásy (forma cykloidních trhlin) (NASA/JPL/Galileo, 1996-2000).....	17
Obr. 4. Cykloidní praskliny na Europě (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000).	17
Obr. 6. Conamara Chaos (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000)	18
Obr. 7. Dómy na Europě (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000)	19
Obr. 8. Čtyři největší impakty na Europě (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000).....	20
Obr. 9. Schéma geologických procesů v ledové kůře v závislosti na její tloušťce. (Petrásek, 2009).	23
Obr. 10. Různé scénáře historie Europy (Petrásek et al., 2009).....	24

Seznam tabulek

Tab. 1. Přehled parametrů Europy (Petrásek et al., 2009).	11
Tab. 2 . Tabulka obsahu iontů v oceánu v závislosti na kyselosti prostředí (Marion et al., 2003).	25

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval především svému školiteli Prof. RNDr. Janu Jehličkovi CSc. za odpovědný přístup ze strany školitele, za trpělivost a za řadu užitečných rad a podnětů. Dále bych rád poděkoval Lence Řezníčkové a Bc. Michaele Kladivové za pomoc při překládání anglických textů.

V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za pochopení a podporu, bez níž by tato práce nemohla vzniknout.

1 ÚVOD

Astrobiologie jako věda, je poměrně mladá a není ještě zcela vyjasněná její definice. Mnohdy se v literatuře můžeme setkat i s názvy, jako je xenobiologie nebo exobiologie. Počátky této astronomické vědy datujeme zhruba na přelomu 60. a 70. let 20. století. Exobiologie je věda, která zkoumá život ve vesmíru, nicméně nemusí jít přímo o život v pravém slova smyslu. Velkým objevem pro mnoho astrobiologů je i přítomnost biogenních prvků, soli nebo třeba ledu, které jsou nedílnou součástí pro vznik života, jak ho známe na Zemi (Ward, 2005).

Vzhledem k velkým vzdálenostem napříč vesmírem můžeme zkoumat pouze malou část naší galaxie. Nejčastější diskutovanou oblastí s možným vznikem života je planeta Mars, která se nachází poměrně blízko naší planety, tedy v tzv. zóně života. Kromě zmíněného Marsu bylo v naší sluneční soustavě nalezeno několik dalších míst, která by mohla být potenciální „kolébkou života“. Jedním z nich jsou čtyři velké Galileovy měsíce obíhající kolem planety Jupiter. Největším z nich je měsíc Ganyméd, který je kromě své velikosti známý i tím, že má pravděpodobně nejhlubší podpovrchové oceány. Druhým a zároveň diametrálně odlišným měsícem je Io, jehož povrch je tvořen sopkami, čímž se stává vulkanicky nejčinnějším tělesem ve sluneční soustavě. Třetím měsícem je Callisto, jenž po ledovou krustou bude zřejmě schovávat slaný oceán. Posledním a v jistém smyslu podobným měsícem, jako je Ganyméd a Callisto, je Europa, kterou se celá tato práce zabývá.

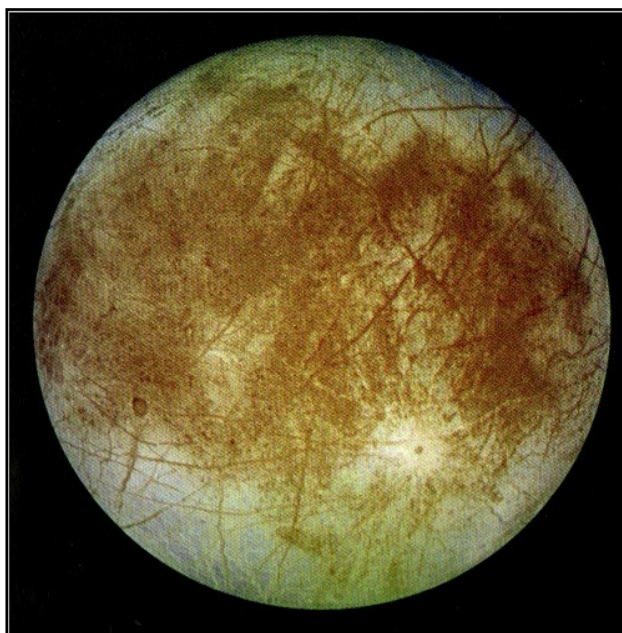
Cílem je odborně shrnout, zda je na Europě možnost existence života ve stejné nebo velmi podobné formě, jako na Zemi. Díky poznatkům, které máme o vzniku života na Zemi, můžeme na základě srovnání posoudit, jestli by mohl na Europě život existovat. Třemi základními ukazateli pro vznik života v podobě, co známe, je výskyt biogenních prvků (S, N, C, O, H, P...), kapalná voda a volný zdroj energie.

Kromě Galieových měsíců jsou zájmovou oblastí astrobiologů i některé měsíce Saturna či Neptuna.

2 CHARAKTERISTIKA EUROPY

Europa je jedním z mnoha měsíců planety Jupiter. Patří mezi tzv. Galileovy měsíce, kam kromě ní patří i měsíce Ganyméd, Io a Callisto. Co se týče velikosti, tak je Europa druhým nejmenším Galileovým měsícem. Nachází se v prostoru magnetosféry Jupitera, ve velmi intenzivním radiačním páse, jenž je srovnatelný s přítomností nestíněného jaderného reaktoru. Střední oběžná vzdálenost od Jupiteru je přibližně 671 034 km. Polohu a umístění Europy ovlivňují i měsíce Ganyméd a Io (Petrásek et al., 2009).

Doba oběhu Europy kolem Jupitera trvá zhruba 3 dny a 13 hodin. Rotace Europy je podobně vázaná, jako rotace Měsíce k Zemi, tedy jedna strana měsíce je stále nakloněná k Jupiteru, proto rozlišuje stranu přivrácenou, odvrácenou a také přední a zadní (Obr. 1).



Obr. 1. Zadní polokoule Europy (NASA/JPL/Galileo, 1997).

Vzdálenost Europy od Slunce je zhruba 5,2krát větší, než Země od Slunce. Vlivem toho dopadá na povrch Europy zhruba jen 1/27 radiačního záření Země, což má za následek nízké průměrně roční teploty povrchu. Teploty kolem $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ nezpůsobuje pouze nízký příjem radiačního záření od Slunce, ale také vysoké albedo měsíce. Příčinou velkého albeda, tedy odrazivosti slunečních paprsků od povrchu, je světlý povrch Europy, který je tvořen z velké části ledem, což má za následek odrazení veškerého dopadající slunečního

záření (Petrásek et al., 2009). Jako přehled parametrů Europy poslouží následující tabulka (Tab. 1).

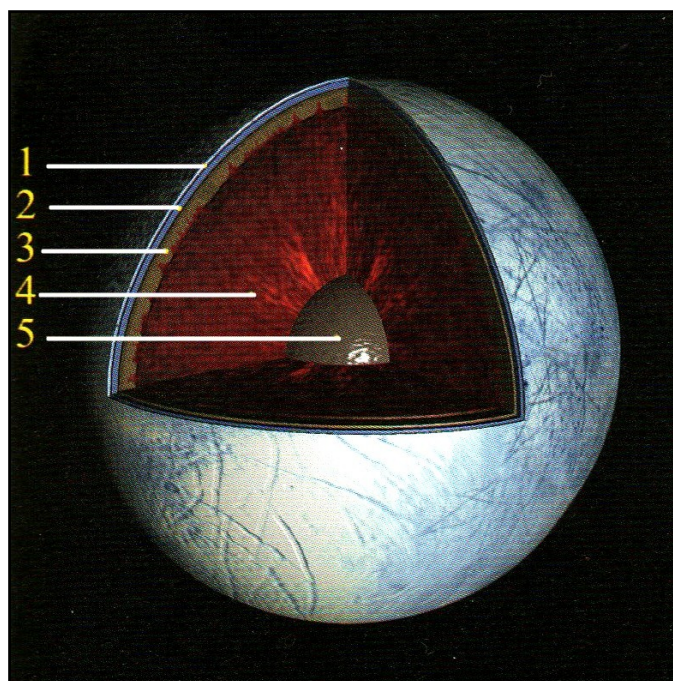
Tab. 1. Přehled parametrů Europy (Petrásek et al., 2009).

Parametr	
Střední oběžná vzdálenost od Jupitera	671,034 km
Doba oběhu kolem Jupitera	3,5512 dní
Excentricita (výstřednost dráhy)	0,0094
Sklon oběžné dráhy k rovníku Jupitera	0,467°
Průměr	3121,7 km
Poměr hmotnosti vůči Zemi	0,00804 hmotnosti Země
Hmotnost	4,8*10 ²² kg
Hustota	3014 kg.m ⁻³
Magnetické pole	Slabé, indukované
Průměrná povrchová teplota	- 170 °C
Gravitační zrychlení	1,31 m.s ⁻²
Albedo	0,67

2.1 Složení Nitra Europy

Europa se svým složením velmi podobá kamenným planetám, jako je Země nebo Mars, nicméně je zde i jistá podobnost s ostatními ledovými tělesy, které nalezneme ve vesmíru (př. komety). Povrch Europy je pokryt ledem, její hustota je přibližně stejná, jako Měsíce nebo sousedního vulkanicky činného měsíce Io.

Europa je tvořena kovovým jádrem podobně jako Země. Nicméně není jisté, zda je v pevném nebo tekutém stavu. Poloměr jádra se odhaduje mezi 160-780 km, složeno z železa, niklu, síry a zřejmě kyslíku. Jádro obklopuje horninový silikátový plášť, který je částečně natavený. Množství natavené složky se směrem k povrchu zmenšuje. Poměrně málo mocnou vrstvou tvoří litosféra, která odděluje podloží tvořené silikátovým pláštěm a nadložní vrstvou, kterou tvoří 80-170 km (Pappalardo et al., 1999) mocná vrstva vody, převážně v kapalném stavu. Povrch Europy je pokryt tenkou skořápkou ledu mocnou 1-50 km (Obr. 2).



Obr. 2. Nitro Europy (Petrásek et al., 2009). 1- ledová krusta o síle 1-50 km, 2- oceán kapalné vody hluboky 80 – 170 km, 3- horninová kůra (litosféra), 4- částečně roztavený Si plášť, 5- jádro složené z Fe, Ni, sloučenin S a O.

2.2 Slapový ohřev

Základním zdrojem energie je radioaktivní rozpad, energie je ukrytá v některých molekulách nestabilních izotopů (například draslíku), které se rozpadají na stabilnější izotopy. Při radioaktivních rozpadech se uvolňuje teplo, které ohřívá okolní prostředí, při dostatečném množství radioizotopů může dojít k tavení okolních hornin. Množství radioaktivních izotopů se nijak neobnovuje a v čase tedy exponenciálně jejich obsah klesá. Z toho lze říct, že rozpady jsou z počátku intenzivnější (Petrásek et al., 2009).

Počáteční množství radioizotopů je ovlivněno velikostí a hustotou tělesa, větší a hustší tělesa mají zpravidla více radioaktivních prvků, než tělesa menší a řidší.

Ohřátí tělesa je úměrné jeho hmotnosti, ztráta tepla je pak daná velikostí povrchu tělesa (pláště). Velikost povrchu roste pomaleji než objem, z čehož vyplývá, že menší tělesa ztrácejí teplo mnohem rychleji. Jen u dostatečně velkých těles dochází k radioaktivnímu ohřevu, který by byl schopný geologicky přetvářet povrch tělesa, což není případ Europy (Petrásek et al., 2009).

Europa a další Galileovy měsíce (kromě Io) mají skořápku tvořenou ledem. Led taje mnohem snáze než běžné horniny. Množství uvolněného tepla stačí na změnu ledu v kapalnou vodu. I přes tento fakt není množství uvolněného tepla natolik velké, aby povrch Europy roztál.

Hlavním zdrojem energie Europy a dalších Jupiterových měsíců je tzv. slapový ohřev (tidal heating). Ten se dá do určité míry přirovnat k slapovým jevům, které probíhají na Zemi. Slapové jevy na Zemi jsou ovlivněny přítomností Měsíce, tedy jednou přirozenou družicí.

V případě Europy je situace složitější. Kolem Jupiteru obíhá několik desítek měsíců, které se navzájem ovlivňují svou gravitací. Europa je nejvíce ovlivněna sousedním měsícem Ganymédem a Io. V důsledku interakce mají Io, Europa a Ganyméd oběžnou dobu v poměru 1:2:4. Tento jev nazýváme Laplaceovou rezonancí. Má za následek větší stabilitu oběžných drah, ovlivňuje jejich excentricitu (výstřednost, vychýlení) a dochází ke zvýšení slapového ohřevu. Slapové jevy na Europě by pak zdvihaly povrch až o 30 metrů, pokud by byl přítomen oceán (v opačném případě 1 m). Slapové jevy doprovází tření, které uvolňuje velké množství tepla. Síla slapového ohřevu je úměrná vzdálenosti od Jupiteru, z čehož můžeme soudit, že slapové jevy a zároveň geologická aktivita se na Jupiterových měsících snižuje se vzdáleností od něj (Pappalardo et al., 1999).

Intenzitu slapového ohřevu ovlivňují i vlastnosti tělesa. Největší slapový ohřev se uplatňuje v prostředích viskózní kapaliny nebo taveniny. U Europy se předpokládá, že za vznikem slapového ohřevu je plastický led, popřípadě částečně tekuté jádro (Greenberg et al., 2002).

2.3 Složení povrchu Europy

Hlavní složkou, co utváří povrch Europy je led. Jeho složení a vzhled se od pozemského ledu poměrně liší, protože na povrchu Europy panují podmínky blízké vakuu. Ve chvíli, kdy se kapalná voda dostane na povrch, tak se začne ihned vařit vlivem nízkého tlaku. Při takto nepříznivých fyzikálně-chemických podmínkách nemůže docházet ke vzniku čistého ledu, jak ho známe ze Země. Evropský led bude silně porézní a bude obsahovat řadu příměsí. Nicméně, několik desítek cm pod povrchem může být situace

úplně jiná. Působením tlaku dochází ke zpomalení procesu mrznutí a může se tak tvořit téměř čirý led (Pappalardo et al., 1999). Tuto situaci můžeme s trochou fantazie přirovnat k rozdílu mezi vulkanickými a plutonickými horninami, kdy led na povrchu Europy reprezentuje vulkanity a led pod povrchem naopak plutonity.

Dalšími poměrně důležitými složkami tvořící povrch Europy jsou hydrát síranu hořečnatého, nazývaný epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) a hydratovaný uhličitan sodný zvaný jako natron ($\text{NaCO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Kromě dvou zmíněných minerálů se na povrchu vyskytuje i peroxid vodíku (H_2O_2), který vzniká radiolýzou ledu, což je rozklad ledu (jeho tání) vlivem ionizujícího záření (Chyba et al., 2001).

Povrch Europy patrně obsahuje i v menším množství síran sodný (NaSO_4), kyselinu sírovou (H_2SO_4), fosforečnany, amoniak, oxid uhličitý, oxid siřičitý, sirovodík a některé organické sloučeniny. (Chyba et al., 2001).

2.4 Povrchové útvary

Platformní pokryv Europy je tvořen z velké části ledem obohaceným o různé sloučeniny solí. Teplota povrchu padá hluboko pod $-100\text{ }^\circ\text{C}$. I přes tuto nízkou teplotu je Europa ovlivňována tektonickými pohyby, respektive i geologická činnost na Europě není žádným ojedinělým jevem. Na povrchu Europy bychom těžko hledali stopy po impaktech z vesmíru, poněvadž její poměrně tenká vrstva ledu je neustále formována a přetvářena různými, jak exogenními, tak endogenními procesy. Ale i přesto můžeme na Europě najít několik kráterů, obvykle jde o deprese geologicky poměrně mladé (10 milionů let), které nestihla geologická činnost Europy zvětrat, popřípadě zanést sedimenty či ledem (Pappalardo et al., 1999).

Povrch Europy je pokryt velkým množstvím depresí a elevací, které z dálky připomínají striaci vzniklou činností ledovce. Tyto rozdíly v reliéfu Europy rozdělujeme na trhliny lineární a rozsáhlé hřebeny, které dosahují délky i přes několik desítek kilometrů. Útvary vznikly rozpraskáním svrchní části ledu, která je v počátcích částečně natavená, nicméně ihned při styku s povrchem tuhne (Lipas et al., 2004).

Na povrchu Evropy můžeme také najít oválná tmavá místa, kterým říkáme lenticuly. Samotný povrch Evropy je členitý a někdy bývá označován, jako „chaos“.

2.4.1 Dvojitý hřeben

Jde o typické geologické úkazy, které lemují povrch Evropy. Jsou to útvary 0,1 km-4 km široké táhnoucí se až tisíce kilometrů. Tvoří je dva hřebenů vysoké první stovky metrů, které jsou odděleny úzkým údolím (Obr. 3). Vznik těchto útvarů nebyl dosud objasněn. Přesto existuje několik teorií vzniku těchto útvarů (kryovulkanismus, působení přílivu a následné vytlačování materiálu či vrásnění hřebenů vlivem působení tlaku na bocích). Hřebenů jsou často překrývány novými tektonickými narušeními (Pappalardo et al., 1999).

Existují i složitější formy těchto hřebenů, které tvoří početnější soustavu tektonických depresí. Vznik těchto hřebenů potvrzuje i existenci oceánů pod ledovým povrchem.



Obr. 3. Dvojitý hřeben (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000). Ukazuje typického dvojitého hřebenu z povrchu Evropy. Dosahuje výšky 300 m a šířky 2 600 m.

2.4.2 Pásky

Útvary podobné hřebenům, které jsou několikanásobně širší. Jejich vznik se podobá vzniku středooceánských hřbetů na Zemi, kdy dojde k částečnému oddělení desek (v případě Evropy jsou desky tvořeny ledem obsahující různé příměsí či části hornin).

Vzniklá mezera je vyplněná materiálem vytlačeným ze svrchního pláště Evropy (Greenberg et al, 2002).

2.4.3 Tektonika pásů a hřebenů

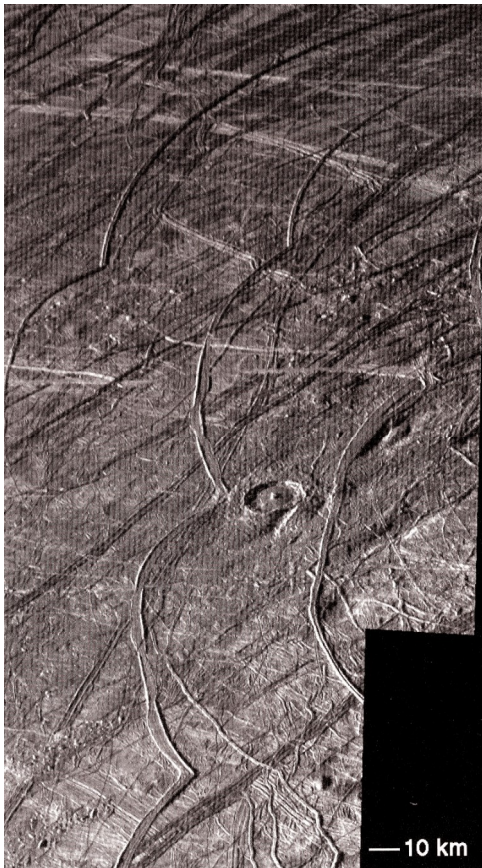
Charakter vzniku pásů a hřebenů indikuje střížný pohyb, kdy dochází k pohybu desek vlivem slapových jevů. Tento tektonický cyklus je rozdělen do čtyř etap:

1. extenze litosférických desek.
2. tlak v přímém směru vykonávající střížný pohyb.
3. komprese zlomu.
4. tlak zpětného střížného pohybu (dochází zde k velkému tření).

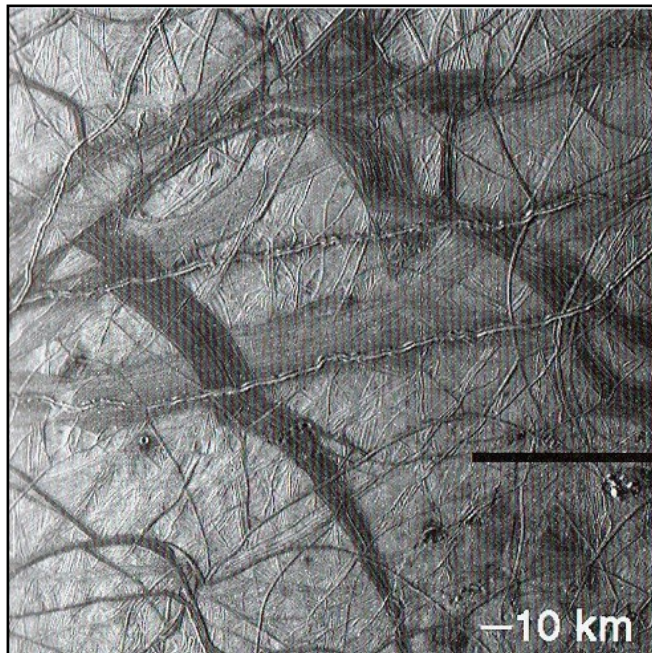
2.4.4 Cykloidní praskliny

Špatně identifikovatelné útvary, které tvoří systémy obloukovitých prasklin. Cykloidní praskliny vznikají důsledkem slapových sil, které v čase mění směr, čímž získává trhlinka obloukovitý až parabolický tvar. S klesající silou slapových jevů ustává i tvorba prasklin. Následující evropský den (3,5 dne pozemského) začíná trhlinka v místě, kde předchozí den skončila. Tento typ prasklin také nazýváme pojmem flexi. (Pappalardo et al., 1999).

Zvláštností cykloidních prasklin (Obr. 4, Obr. 5) je to, že jejich směr a rozmístění neodpovídá klasickým modelům, kdy je kamenné těleso ovlivňováno vázanou rotací. Z čehož můžeme usuzovat, že povrchová vrstva ledu Evropy nemá vázanou rotaci k Jupiteru a pohybuje se nebo alespoň pohybovala. Tento typ „nevázané“ rotace nazýváme diferenciální. Zde je pak podmínkou, že led musí plavat na kapalné vrstvě, aniž by vznikalo větší tření. Pohyb této ledové skořápky je téměř zanedbatelný, jelikož doba oběhu je řádově 10 000- 250 000 let (pozemských). (Greenberg et al., 2002).



Obr. 4. Cykloidní praskliny na Europě (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000).



Obr. 5. Klínové pásy (forma cykloidních trhlin) (NASA/JPL/Galileo, 1996-2000).

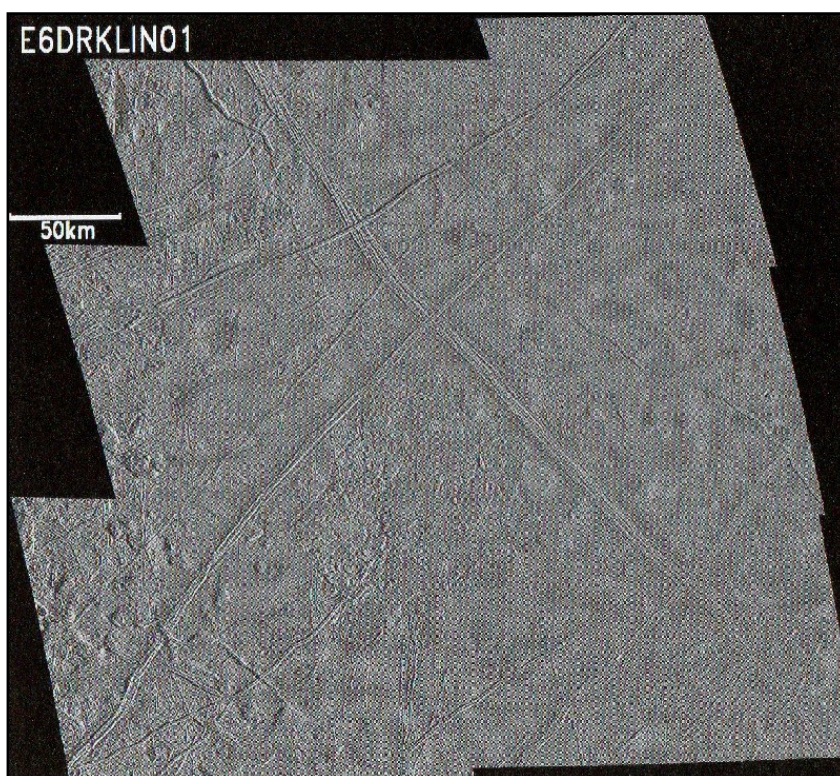
2.4.5 Putování pólů

Podobně jako na Zemi, tak i na Europě je ledová krusta tlustší v oblasti pólů, ale není ovlivněna primárně množstvím dopadajícího radiačního záření, ale nižším působením slapového ohřevu. Na základě těchto informací víme, že ledová vrstva Europy je v oblasti rovníku menší, poněvadž zde působí větší slapový ohřev. Vlivem odstředivé síly dochází k odsouvání ledu od pólu k rovníku. Následkem tohoto se celá ledová pokrývka pohybuje, čímž se posouvá původní bod pólu směrem k rovníku (do nižších zeměpisných šířek) (Sarid et al, 2002).

Dnes jsou s velkou pravděpodobností tyto trhliny (praskliny, pásy, hřebeny) již tektonicky neaktivní. Aktivita těchto trhlin je řádově v desítkách tisíců let.

2.4.6 Chaotické regiony

Chaotickými regiony (Obr. 6) nazýváme oblasti na povrchu Evropy, kde došlo k rozpraskání ledového povrchu na jednotlivé části (ledové kry), které byly zčásti nahrazeny nataveným materiálem ze spodních vrstev. Mezery jsou pak z pravidla vyplněny tmavší hmotou obsahující příměsi. Nejznámější oblastí na Europě je pak Conamara Chaos, která má rozměry 100 x 120 km (Geissler et al., 2004).



Obr. 6. Conamara Chaos (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000). Nejznámější chaotická oblast Evropy.

2.4.7 Lentikulární oblasti

Menšími útvary podobné chaotickým regionům jsou tzv. dómy (Obr. 7), které mají kruhový tvar a tyčí se do výšky až stovek metrů. Kromě dómů zde můžeme také naléznout různé typy depresí. Nejčastějšími jsou tmavé okrouhlé skvrny, kterým říkáme lentikuly. V průměru mají 7-15 km a vznikají vzestupem teplejšího ledu směrem k povrchu (Pappalardo et al., 1999).

2.4.8 Vznik chaotických a lentikulárních oblastí

O vzniku chaotických a lentikulárních oblastí se vedou dvě teorie. První představa vzniku je taková, že ledová vrstva je částečně hydrotermálně natavena zespoda, následkem toho by mělo dojít k rozpraskání ledu. Po ukončení hydrotermální činnosti se opět ledová vrstva scelí.

Druhá teorie podporuje myšlenku výstupu diapirů teplého ledu důsledkem nižší hustoty. Vzhledem k energetické náročnosti se zdá pravděpodobnější teorie výstupů diapirů, nasvědčují tomu i snazší ohřev prostřednictvím slapových jevů (Pappalardo et al., 1999).

Samotné geologické pochody na povrchu Evropy by pak znatelně ovlivňoval obsah plynných hydrátů v diapirech, které nazýváme jako klatráty. Tyto hydráty tvoří špatně tepelně propustnou vrstvu, což může mít za příčinu omezení proudění tepla, respektive ohřívání spodních vrstev. Následkem toho může a mohlo docházet k roztavení nebo částečnému natavení. Pokud by se klatráty pomocí diapirů dostaly na povrch, vedlo by to k explozivním reakcím plynu, podobné třeba u vzniků vulkanických útvarů, které nazýváme maary. Právě takovéto exploze by mohlo deformovat nadložní vrstvy ledu a následně vytvářet chaotické či lentikulární oblasti. Jde pravděpodobně o geologicky nejmladší útvary (Prieto-Ballesteros et al., 2005).



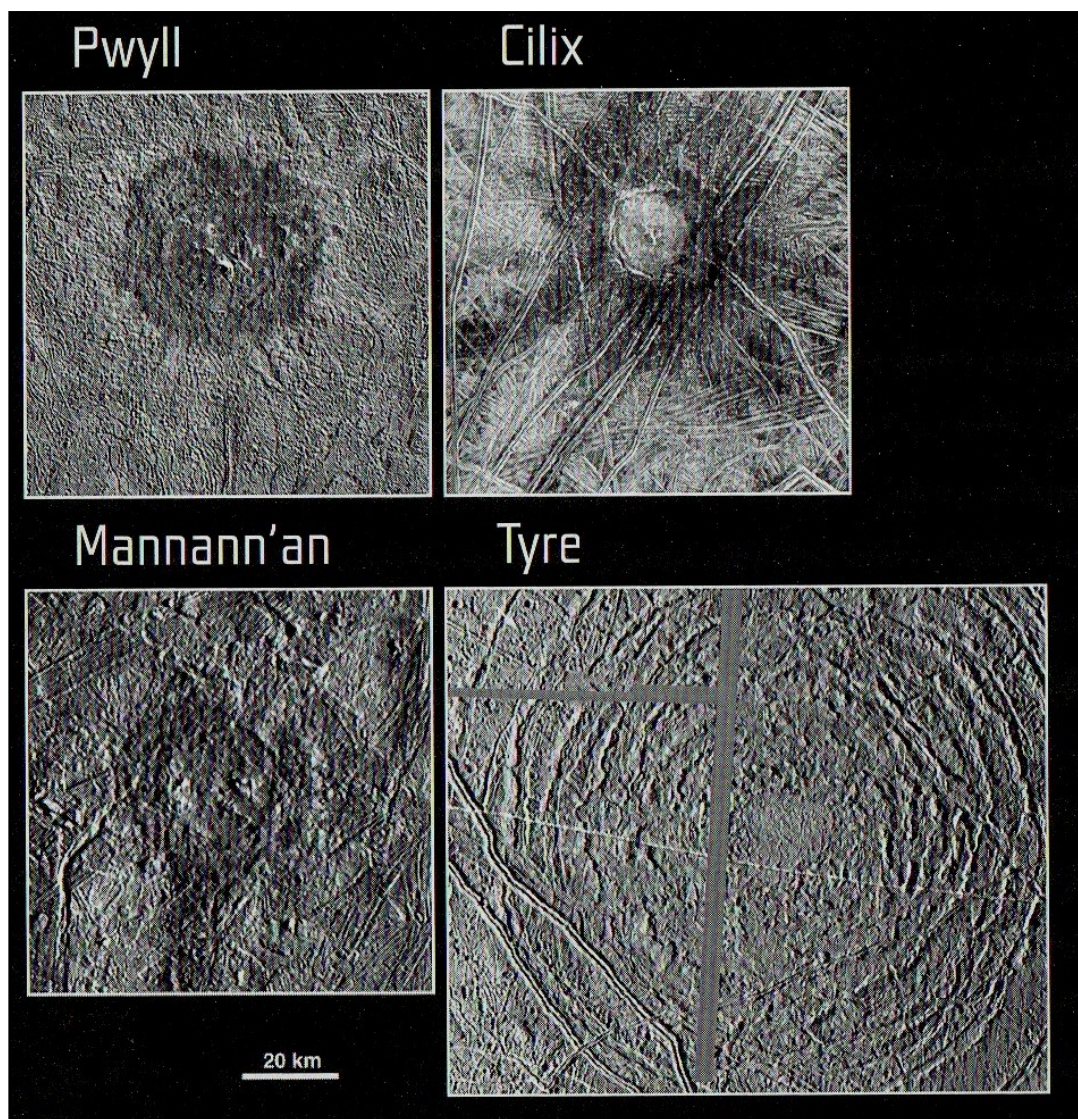
Obr. 7. Dómy na Europě (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000). Snímek ledové pláně Evropy s typickými zlomy a hřebeny

2.4.9 Impaktní krátery

Povrch Evropy je na impaktní krátery (Obr. 8) poměrně chudý, přestože vlivem gravitační síly Jupitera by to mělo být spíše naopak. Tento malý počet impaktů lze

vysvětlit tím, že povrch Europy je neustále geologicky činný, tudíž se deprese po kolizi s vesmírným tělesem brzy zaplní a zmizí.

Největším kráterem Europy je Tyre s průměrem 40 km, dále pak Pwyll 26 km, Cilix o průměru 20 km a Mannann'an. Skrze ledovou krustu pronikl patrně jen Tyre, který byl následně zatopen, což má také za příčinu prstencovitěho tvaru kráteru Tyre.



Obr. 8. Čtyři největší impakty na Europě (NASA/JPL/Galileo, 1996 - 2000).

3 OCEÁN NA EUROPĚ

3.1 Ledová vrstva Evropy

Jak již bylo zmíněno, tak vodou a ledem tvořená krusta tvoří zhruba 80-170 km silnou vrstvu. Nicméně, pořád nám zůstává jedna otázka nezodpovězená, nevíme, v jaké hloubce se ukrývá kapalná voda. Samotná šířka ledu, která tvoří povrchovou vrstvu měsíce, je v mnoha ohledech důležitá. Podle množství energie, kterou Evropa dostává, tedy čím více tepla pohltí, tak tím bude ledová vrstva tenčí. Následně také indikuje, že s větším množstvím přijaté energie, bude energomateriálová výměna mezi povrchem a oceánem vyšší. Šířka je také důležitá z hlediska budoucího průzkumu, především kvůli místu a hloubce vrtu. Ohledně tloušťky ledu na Evropě panují dvě teorii (Petrásek et al., 2009).

3.1.1 Greenbergova teorii tenké krusty

První teorii zastává Richard Greenberg z Arizonské univerzity, který tvrdí, že musí být ledová krusta měsíce poměrně tenká a nepřesahuje mocnost 6-10 km (O'Brien et al., 2002). Pokud by tomu tak bylo, musel by být led rigidní povahy a teplo by se šířilo kondukcí. Na základě toho lze předpokládat, že teplota vody v oceánu může dosahovat i kladných hodnot.

Podle Richarda Greenberga a jeho skupiny by tenká ledová krusta znamenala neustálý kontakt oceánu s povrchem, dokonce se domnívá, že takto vznikaly dvojité hřebeny. Představa je asi taková, že tektonicky vzniklé průrvy na povrchu měsíce sahají až ke kapalnému evropskému oceánu, kde pod vysokým tlakem stoupá voda obohacená o částečně natavený led a horniny v podobě gejzírů (Greenberg et al., 2002). Poté, dochází na povrchu Evropy k okamžitému utužení a vytvoření elevací v podobě valů, které se spojují s dalšími valy a tvoří tak zmíněné dvojité hřebeny, jejich tvorba patrně stále probíhá.

Chaotický terén a výskyt lentikulů vysvětluje Greenberg, jako částečné natavení ledové krusty, při kterém se vytvářejí velké bloky ker, jež se různými způsoby otáčejí a převracejí. Za vznikem ker stojí submarinní vulkanismus, který ohřívá vodu nad sebou. Ohřátá voda stoupá nahoru a taví spodní vrstvy ledové krusty (O'Brien et al., 2002).

Robert Pappalardo z univerzity v Coloradu tuto teorii zavrhuje a spíše se přiklání k názoru, že ledová krusta je silnější.

3.1.2 Pappalardova teorie silné krusty

Teorie silné krusty je v mnoha kritériích diametrální odlišná od předchozího modelu. Podle Pappalarda se ledová krusta skládá ze dvou vrstev. Horní vrstva by tloušťkou a sloužením odpovídala Greenbergovu modelu. Nicméně, tato vrstva není přímo ve styku s oceánem, jak tvrdí teorie tenké krusty. Pod horní vrstvou se totiž nachází další vrstva, jenže je tvořena plastickým nataveným ledem. Tato vrstva je silnější a neprobíhá zde přenos tepla kondukcí, ale konvekcí (prouděním). Konvekce tak udržuje konstantní teplotu. Podobné procesy můžeme pozorovat i na pozemských ledovcích. V této vrstvě by patrně měly vystupovat na povrch i diapiry, které podle teorie tenké krusty stojí za vznikem dómů, chaosu a lentikul. Vzniklé povrchové trhliny se tedy dostávají pouze do úrovně, kde se mísí led důsledkem konvektivních proudů. (Pappalardo et al., 1999).

Složitější je poté vysvětlit pohyby ker, jelikož se různými směry otáčejí a převracejí, je tedy nutné, aby se pohybovaly v kapalné vodě. Avšak existuje možnost, že se mezi vrstvami nachází drobné polohy tvořené evapority, které snižují bod tání, potom by mohl částečným natavením změnit led své skupenství a stát se kapalným, tudíž není nutné, aby docházelo k protavení ledové krusty ve vertikálním směru (Pappalardo et al., 1999).

Pappalardova teorie tedy nepředpokládá, že by docházelo k přímému kontaktu mezi povrchem a oceánem.

3.1.3 Tenká vs. silná ledová krusta

Pro šířku ledové krusty je klíčový tepelný tok. Čím vyšší bude tepelný tok, tím může být vrstva tenčí. Bohužel, proti teorii Greenberga hovoří fakt, že by Europa musela mít mnohonásobně větší tepelný tok než Země, což je vzhledem k okolnostem spíše nepravděpodobné, avšak v případě silného slapového ohřevu kapalného horninového pláště a částečným natavením jádra měsíce možné.

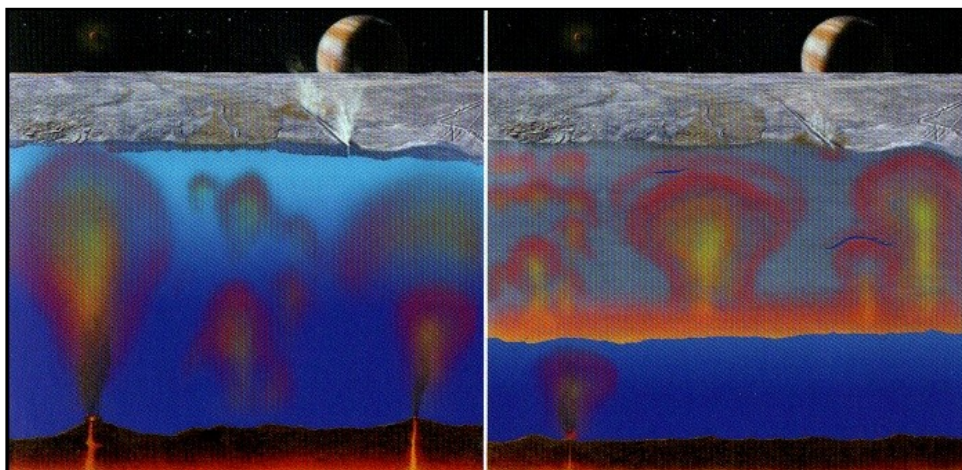
V neprospěch teorie tenké krusty mluví i fakt, že by jádro Europy muselo být od počátku Sluneční soustavy rozžhavené a to dle vytvořených geofyzikálních modelů není

možné. To je zároveň jeden z hlavních argumentů Pappalarda, proč je ledová křusta silnější. Ten naopak tvrdí, že Europa je geologicky spíše neaktivní a význam slapového ohřevu méně významný. Usuzuje, že hlavní ohřev probíhá ve vrstvě plastického ledu (O'Brien et al., 2002).

Dalším Argumentem Pappalarda je reliéf měsíce, konkrétně jeho elevace. Pokud by byl led silný jen několik kilometrů, patrně by se propadl pod tíhou hřebenů, lentikul a dalších těles, které se nachází na Europě. (Pappalardo, 1999).

Posledním z hlavních argumentů, který spíše mluví ve prospěch teorie silné křusty, jsou krátery po impaktech. V případě tenké křusty by docházelo k častějšímu kontaktu mezi povrchem a oceánem (Petrásek et al., 2009).

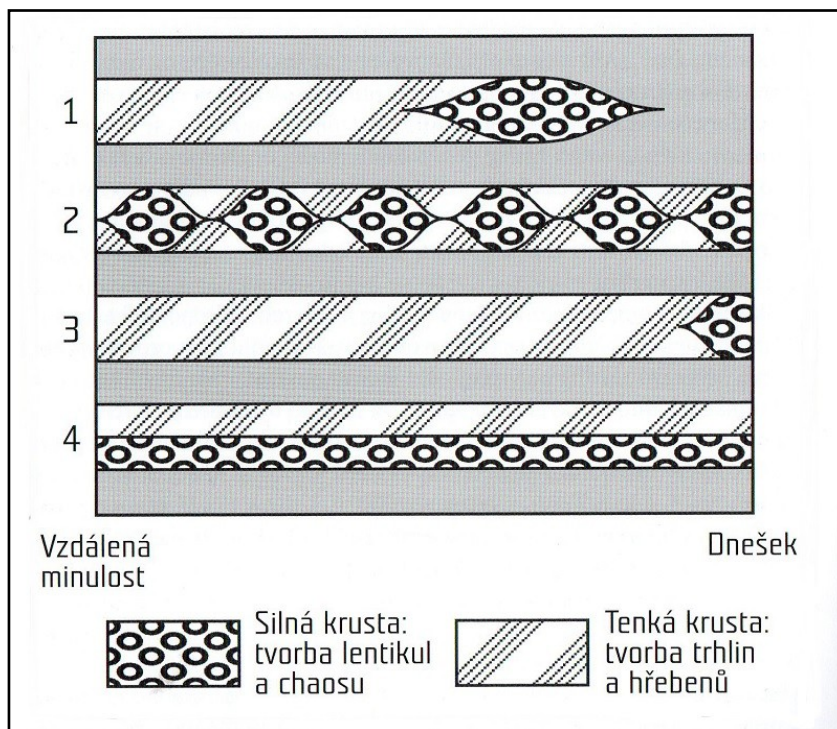
Nelze předpokládat, že bude všude stejně silný led. Lze tedy říct, že v zásadě mohou být obě teorie pravdivé, ale jak kde (Obr. 9). To stejné bychom mohli říct o slapovém ohřevu, který nemusí všude dosahovat stejných hodnot. Patrně i malé změny slapového ohřevu mohou vyvolat zásadní změny. Tyto výkyvy se často spojují se změnami orbitální rezonance mezi Io, Europou a Ganymédem (Mitri et al., 2005).



Obr. 9. Schéma geologických procesů v ledové kůře v závislosti na její tloušťce. (Petrásek, 2009).

Pokud by skutečně byl tento jev natolik zásadní, tak můžeme aplikovat obě teorie na jeden model (Obr. 10). V první fázi vývoje Europy bychom očekávali vyšší slapový ohřev, tedy tenčí vrstvu, což by podporovalo teorii Greenberga, naopak s postupem času by se síla slapového ohřevu snižovala, což by vedlo k nárůstu ledové vrstvy, což by naopak

potvrzovalo teorii Pappalarda. Pokud to shrneme, tak by Europa připomínala v jistém smyslu Zemi. Na počátku geologicky aktivnější s menší ledovou krustou, naopak dnes méně aktivní s větší ledovou krustou. Nicméně, nelze předpokládat, že Europa postupně vlivem slapového ohřevu způsobeného orbitální rezonancí sousedních těles chladna. Patrně docházelo k periodickým oscilacím, tudíž docházelo k vzájemnému proplétání obou teorií (Petrásek et al., 2009).



Obr. 10. Různé scénáře historie Evropy (Petrásek et al., 2009). Šrafovane jsou znázorněna období slabé ledové krusty, kdy vznikaly lineární útvary, oválky naopak značí vznikání chaotických terénů a lentikul, tedy pravděpodobně diapirismus, asociovaný snad s obdobími silné krusty.

- 1- V současné době žádná geologická aktivita neprobíhá a pozorovaný povrch je zmrzlou plání.
- 2- Oba procesy se cyklicky střídají (vliv orbitální oscilace).
- 3- Nedávný výskyt diapirismu je anomálie, která se dříve nevyskytovala.
- 4- Oba procesy probíhají současně v různých oblastech měsíce.

3.2 Složení oceánu

Neexistuje jednotný model, co by jasně řekl, jaké povahy je složení vody evropského oceánu. Voda může být čistá, ale klidně také silně hypersalinní. Její pH může být téměř jakékoliv.

3.2.1 Salinita

V čem se většina vědců shoduje, že voda bude obsahovat různé hydráty soli. Existují asi tři nejznámější rozmezí. Podle první skupiny vědců se salinita pohybuje kolem 300-500 g/kg soli, což je pro srovnání 1 a ½ vyšší hodnota, než v Mrtvém moři. Zdrženlivější vědci tuto hranici pokládají níže, tedy zhruba na úroveň pozemským

oceánům (1-100 g/kg). Poslední skupina pak zastává hranici kolem 0,7 g/kg (Cythia Phillips, 2004). Dolní hranice 0,7 g/kg soli není náhodná, je to minimální hodnota, která dovoluje dostatečnou vodivost pro pozorování magnetického pole.

Otázkou pak nastává, zda je salinita překážkou pro možný život na Europě? Odpověď zní ne, pokud tedy nebudeme brát v potaz extrémní hypersalinní podmínky, kde by přežily pouze extrémní halofilové.

Vzhledem k nedostatku informací o složení vody v evropském oceánu, se snažíme vycházet z toho, co je na povrchu. Díky družicovým snímkům víme, že na povrchu se vyskytují evaporitické minerály, kterou s sebou nesou prvky, jako je hořčík či sodík. Samotné modely kyselosti pak můžeme rozdělit pomocí pH (Tab. 1):

Tab. 2 . Tabulka obsahu iontů v oceánu v závislosti na kyselosti prostředí (Marion et al., 2003).

Model	Rozmezí pH	Kationty	Anionty	Eutektický bod
Neutrální	~ 7	Na ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺	SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻	-34,5 °C
Alkalický	9,7 - 10,1	Na ⁺ , K ⁺	Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁻	-23,5 °C
Kyselý	-1,1 - +	Na ⁺ , H ⁺ , Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	-38,5 °C

Poměrné zastoupení a absolutní obsah solí se budeme měnit v závislosti na teplotě a tlaku. V případě vysokých koncentrací mohou být roztoky soli kapalné i při teplotách nižších než -20 °C, to je zároveň hranice pro existenci aktivního života (Petrásek et al., 2009).

Pokud bychom předpokládali, že bude oceán kyselý, musel by obsahovat velké množství kyseliny sírové, díky níž může hodnota pH klesnout i pod nulu. Nicméně, takové prostředí by bylo pro acidofilní bakterie smrtelné.

Jestliže by byl oceán spíše alkalický, můžeme očekávat přítomnost oxidu uhličitého, a to v podobě uhličitánů, plynů anebo klatrátů (vodní led s vmezeřenými molekulami vody).

Všechny modely (neutrální, alkalický, kyselý) předpokládají, že v evropském oceánu panují oxidační podmínky. Svědčí o tom především výskyt síranů, pro které je toto

prostředí typické. Jestli bychom uvažovali o redukčním prostředí, tak by sírany musely nahradit sulfidy (Zolotov et al., 2004).

3.2.2 Teplota oceánu

S teplotou je to asi stejně problematické, jako se salinitou, neexistuje jednotný model. Co ovšem můžeme s jistotou říct, že oceán musí mít teplotu nad bodem tuhnutí. Bohužel, oceán není složen z čisté vody, ale obsahuje mnoho příměsí, tudíž se teplota může pouze odhadovat.

Pro kapaliny je důležitý tzv. eutektický bod, který udává hranici pro možnou existenci v kapalném stavu. Dolní hranice eutektického bodu „vody“ evropského oceánu může dosahovat až k -40°C (v případě kyselého pH). Naopak horní hranice bude někde mezi nulou a -40°C . Usuzuje se na základě toho, že na povrchu Evropy nemůže být vyšší teplota než nula, poněvadž by led roztál. Stejně podmínky musí tedy platit i pro spodní vrstvu ledové krusty (styk ledové vrstvy s oceánem). V literatuře se nejčastěji setkáváme s teplotami oceánu v rozmezí -3 až -10°C , vyloučené nejsou ani vyšší teploty (Petrásek et al., 2009).

Podle modelu H. J. Meloshe by mohla být teplejší voda oceánu separována do termických anomálií, které jsou od okolí separována chladnější vodou, to by následně bránilo konvekci. Tento model lze použít pouze v jednom případě, voda by musela mít teplotu okolo 4°C , jelikož to je teplota, kdy má voda největší hustotu, tudíž by se držela při dně a vytlačovala chladnější vody nahoru, k čemuž koneckonců dochází i na Zemi (Melosh, 2004).

Abychom mohli tento model uvést do praxe, musela by být voda evropského oceánu spíše brakická a zároveň ledová krusta by nesměla přesahovat mocnost 23 km (Melosh, 2004). Pokud by tyto podmínky nebyly zachovány, nemohla by vzniknout hustotní anomálie a následná teplotní inverze.

Melosh ovšem argumentuje tím, že by mohlo docházet k tání povrchové ledu, což by mohlo mít za příčinu vzniku dvou vrstev vody. Jedné chladnější a méně slané, druhé naopak slanější a teplejší. Chladnější vrstva by se držela při povrchu, naopak teplejší spíše

při dně. Tento stav by zamezoval pohyb konvektivním proudům důsledkem gradientu salinity, tudíž by nedocházelo k vyrovnávání teploty.

Podle měření, která byla provedena na Zemi, zde existuje místo, jež by mohlo potvrzovat Meloshovu teorii. Jedná se o antarktické slané jezero Vanda, které je na povrchu zamrzlé, ale při dně dosahuje údajně teplot kolem 25 °C.

S podobnou teorií přichází i Prieto-Ballesteros a Kargel, kteří předpokládají, že by se na dně oceánu mohli tvořit i geotermálně zahříváné solanky.

3.3 Mořské dno

Podloží mořského dna bude zřejmě složeno z bazaltových skal. Podle některých dalších teorií by dno evropského oceánu mohla pokrývat tenčí vrstva vysrážených evaportických minerálů. Zmíněná solná vrstva by pak mohla být oblast zdrojová oblast kumulovaného geotermálního tepla. Pokud by k takovému jevu skutečně docházelo, vedlo by to ke vzniku horkých solanek, které by mohly vyvěrat na dno oceánu. V případě, že by tento model neobstál a dno oceánu bylo spíše chladné, mohl by zde vznikat život.

Marion (2007) ve svém výzkumu poukazuje na možnou tvorbu vysokotlakého „spodního“ ledovce (Marion et al., 2003), jehož příčinou by docházelo, že vrstva vody není mezi dnem a ledem, ale pouze mezi ledem tvořenými vrstvami. Nicméně, laboratorní pokusy ukázaly, že bakterie mohou žít i v mikroskopických kapalných komůrkách. Navíc Marionova teorie počítá s tím, že hloubka oceánu je kolem 200 km, s čímž se mnoho autorů neztotožňuje, tudíž ani nepředpokládá, že by docházelo k tvorbě vysokotlakého ledovce.

Kromě zmíněných evaporitů bychom mohli na dně oceánu najít také klatráty obohacené o oxid uhličitý, metan a další sloučeniny. Jejich výskyt je vázán především na tlak, teplotu a koncentraci. Klatráty se vizuálně podobají ledu, ale jsou právě obohacené o molekuly řečených sloučenin. Dalším faktorem, který ovlivňuje výskyt klatrátů je Archimédův zákon. Pokud by byl oceán spíše slaný, tak by se klatráty pohybovaly při hladině. U modelu s méně slaným až brakickým oceánem by docházelo k akumulaci klatrátů na jeho dně, tedy s výjimkou methanu, který byl stále plaval. Tato na první pohled

nevýznamná vrstva by mohla být důležitou oblastí zkoumání existence života v budoucnosti (Price et al., 2002).

Na rozdíl od povrchu, vědci předpokládají, že dno oceánu Evropy je ploché. Usuzují tak na základě málo intenzivní geologické činnosti. Přesto i malá vulkanická činnost může vytvořit poměrně vysoká horstva. Typickým příkladem je třeba Olympus Mons na Marsu. Nicméně, vysoké hory, jako jsou na Marsu, tu očekávat nemůžeme. Na Evropě je sice gravitace znatelně menší, než na Zemi, což by mohlo přispět k tvorbě orograficky vysokých pohoří, ale vzhledem k její velikosti je téměř nemožné, aby došlo k akumulaci takového množství hmoty (Petrásek et al., 2009).

3.4 Podmořský vulkanismus a hydrotermální činnost

Vznik života na dně oceánu, jak již víme z pozorování na Zemi, existuje díky submarinnímu vulkanismu a hydrotermální činnosti, což bychom mohli aplikovat i na prostředí evropského oceánského dna. Důležitým ukazatelem v této oblasti je tepelný tok, který mění teplotní gradienty a je příčinou chemické nerovnováhy. Pro astrobiologii je významný nadbytek tepelného toku, protože právě tak může dojít ke změně teploty či chemické stability (Lowell, 2005).

Co se týká hodnoty tepelného toku, existuje několik teorií. Lowella a DuBose (2005) odhadují minimální hodnotu pro Evropu asi na 12% pozemského tepelného toku (PTT), maximum 600% PTT, pokud by existoval významný slapový ohřev v silikátovém plášti. Squyres došel k hodnotě tepelného toku kolem 50% PTT a byl skeptický ohledně existence, respektive rozsahu geotermální činnosti. Nimmo, Pappalardo a Giese dospěli na základě studia krusty k podobné hodnotě 56% (Nimmo, 2003). Hussmann a Spohn (2003) odhadují přibližně 30-40% PTT, v minulosti ale i přes 500%.

V případě, že by byly tepelné toky vysoké, jak odpovídá představa tenké krusty, byla by Europa geologicky činnější. O'Brien, Geissler a Greenberg uvádějí, že při stejných vlastnostech nitra, jaké má Io, by Europa mohla disponovat trojnásobkem PTT, při jiném modelu dokonce až pětinasobkem (O'Brien et al., 2002). Podobně Geissler za předpokladu roztaveného nitra Evropy udává horní limit okolo 50% PTT a nevylučuje ani silnou vulkanickou aktivitu, vedoucí až k lokálnímu protavení ledovcem. Hodnoty tepelných toků

se dle mnoha autorů liší. Hlavní příčinami jsou orbitální systém Jupitera a stav nitra Evropy.

Podmořský vulkanismus na Europě bychom zřejmě mohli přirovnat k vulkanismu na dně oceánů na Zemi, kde se budou tvořit tělesa polštářových láv. Samozřejmě za podmínek, že bude tepelný tok dostatečně velký. Na existenci podmořského vulkanismu reagují McKinnon a Shock tím, že tloušťka litosféry je přibližně 200 km silná. Přesto nevyklučují možnost submarinního vulkanismu spojeného se zvýšeným projevem slapového ohřevu (McKinnon, 2001).

Co se týká hydrotermální činnosti, ta bude patrně mnohem intenzivnější než vulkanická činnost. Nelze vyloučit přítomnost hlubokomořských horkých zřidel, která produkují vodou zbarvenou sulfidem železnatým. Tato zřídla nazýváme tzv. černými kuřáky, jejichž výskyt byl pozorován i na dnech pozemských oceánů.

Pro výskyt černých kuřáků je optimální teplota až kolem 400 °C (Petrásek et al., 2009), díky vysokému tlaku zůstává voda v kapalném stavu. Hodnota pH vody se pohybuje okolo 2,8. Kromě sulfidů železa obsahuje sirovodík, sloučeniny manganu, vodík, metan a některé toxické kovy (Zn, Cu.). V okolí kuřáků poté dochází k akumulaci vrstev pyritu či jiných dalších minerálů. Příčinou těchto akumulací je výskyt chladnější vody v okolí, dochází tedy k vysrážení minerálů. Samotný kuřák tak může získat až několik metrů na výšku. Místa kuřáků jsou vázána na styk oceánských hřbetů, kde dochází k divergenci litosférických desek. To jsou místa se stálým zdrojem tepla a horninového materiálu, který je pro vznik kuřáků důležitý. Vývěry tak poskytují nejen zdroj tepla, ale podílí se také na udržení chemické instability, což může sloužit pro některé organismy, jako zdroj energie potřebný k životu. Na rozdíl od podmořského vulkanismu, by hydrotermální činnost na dně evropského oceánu mohla existovat i při poměrně nízkých hodnotách tepelného toku (Novák, 2009).

Kromě černých kuřáků máme také tzv. bílé kuřáky, kteří se liší teplotou vyvěrající vody a sloučenin. Dominantní sloučeninou bílých kuřáků není sulfid železnatý, ale uhličitan, jenž způsobuje bílé zbarvení. Průměrná teplota bílých kuřáků obvykle

nepřesahuje 90°C a prostředí je silně zásadité (pH až 11). Dalšími unikajícími látkami jsou vodík, metan, vápník, uhličitany, křemík a baryum. Stěny komínů kuřáku nejsou tvořeny pyritem a dalšími minerály, jak tomu u černého kuřáka, ale hlavní složku stěn tvoří uhličitan vápenatý. Bílí kuřáci nejsou přímo vázání na divergentní rozhraní dvou litosférických desek (nepotřebují takový zdroj tepla) a mohou se tedy vyskytovat i poměrně daleko od styku dvou desek. Jejich životnost je také delší, respektive jsou stabilnější a nedochází k jejich poničení v takové míře. Jejich hnací silou je chemický proces nazývaný serpentinizace (přeměna mafických hornin na serpentinity). K tomuto procesu dochází v situaci, kdy mořská voda proniká do peridotitu (hornina zemského pláště bohatá na olivín). Při reakci s vodou dochází k přeměně na magnetit a hydratovaný serpentinit. Jde o exotermickou reakci, dochází ke vzniku tepla a vodíku, což má za následek vznik metanu a sulfanu z původních uhličitánů a síranů. Serpentinizace je vázána na tělesa peridotitů, teplotu a prosakující vodu, což by mohlo existenci bílých kuřáku značně omezovat. (Petrásek et al, 2009).

Pro výzkum života se stává hydrotermální činnost předmětem zájmu, protože právě zmínění kuřáci by mohli být potřebným zdrojem energie podmořských organismů.

4 EXISTENCE ŽIVOTA NA EUROPĚ

4.1 Základní podmínky

Základními podmínkami pro život na Europě je prvkové složení, salinita, pH, tlak a teplota.

4.1.1 Prvkové složení

Základními prvky pro vznik života jsou uhlík a voda. Uhlík bychom mohli na Europě hledat v oblastech impaktních kráterů, protože právě kosmická tělesa jsou uhlíkem a jeho sloučeninami obohacena. Nicméně, množství obsaženého uhlíku nebude nijak razantní. (McKinnon et al., 2011).

Existenci vody není nutné nijak dokazovat, voda se ve formě pevné a snad i kapalné na Europě vyskytuje. Dalším důležitým prvkem je dusík, který zatím nebyl na Europě nalezen, ale v menších množstvích můžeme jeho přítomnost očekávat. Naopak síra a její sloučeniny jsou na povrchu a patrně i pod ním velmi hojné. Dále se vedou spekulace o přítomnosti fosforu, jenž by se mohl vyskytovat v evaporitech, popřípadě se dostávat na povrch podobným způsobem, jako uhlík, tedy z okolního vesmíru. (McKinnon et al., 2011). Další důležité prvky pro život (sodík, hořčík, vápník, draslík a chlór) můžeme na povrchu a i pod ním očekávat také.

4.1.2 Salinita a pH

Salinita a pH evropského oceánu není dosud známá, tudíž můžeme jen usuzovat. Pro vznik života by však neměla být salinita ani pH limitující. Potíže by přicházely, až ve fázi, kdyby v evropském oceánu panovaly extrémní podmínky, tedy hypersalinní prostředí a velmi kyselé či zásadité prostředí (Marion, 2003).

4.1.3 Tlak

Vzhledem k faktu, že Europa má mnohonásobně menší gravitaci, než Země, tak zde i v poměrně velkých hloubkách působí nízký tlak. Nicméně, evropský oceán je mnohem hlubší, než ten na Zemi. V hloubkách zhruba 100 km panuje tlak okolo 130 MPa, což je srovnatelně stejná hodnota, jako v Mariánském příkopě. Pokud bychom uvažili maximální hloubku oceánu 170 km a hustotu solných roztoků 1300 kg/m^3 , panoval by v těchto

hloubkách tlak až 300 MPa. I při těchto podmínkách zde může panovat život, jemuž nevadí působení vysokého tlaku, odborně tyto organismy nazývané jako barofilní (Marion, 2003).

4.1.4 Teplota

Jak již bylo zmíněno v předcházející kapitole o evropském oceánu, jeho teplota se pohybuje v rozmezí +4 až -40°C. Pokud by v oceánu převládaly spíše chladné podmínky, byla by biodiverzita málo rozmanitá. Chladné podmínky totiž zpomalují metabolismus a omezují reprodukci. Nicméně, jak již víme z pozorování na Zemi, tak někteří extremofilní organismy v chladných obdobích svou činnost pozastaví a dostávají se do stavu podobného hibernaci. Dojde tedy k úplnému útlumu a energetický výdej je minimální. Z toho bychom mohli usuzovat, že v chladném prostředí evropského oceánu budou spíše organismy energeticky nenároční. Hranice pozemského života, kdy organismus funguje, ale není schopen růstu a reprodukce je -20°C (Marion, 2003).

Nicméně, evropský oceán může mít také oblasti s vysokoteplotními podmínkami. Půjde patrně o místa vázané na geotermální aktivitu (černí kuřáci).

4.2 Minulost Evropy

Pokud se ohlédneme do minulosti, tak byla Evropa geologicky mnohem činnější těleso. Její povrch byl pravděpodobně tvořen oceány a atmosféra byla mnohem hustší, přestože část unikala do kosmu. Příčinou je nízká gravitace, která neudrží lehké prvky, proto vodík unikal do kosmu, zatímco kyslík se držel při povrchu. Za oteplením Evropy stojí zřejmě tři faktory. Prvním jsou častější impakty z vesmíru (lokální oteplení). Druhým faktorem je rozpad radioaktivních izotopů, jejichž intenzita byla v minulosti větší. Posledním a zároveň nejdůležitějším faktorem byl samotný Jupiter. Podle některých astrobiologů, jako je Dirk Schulze-Makuch byl Jupiter mnohem objemnější a žhavější. Co do velikosti a teploty bychom ho mohly s trochou nadsázky přirovnat k hnědým trpaslíkům, tedy vesmírným tělesům, která neměla dostatek hmotnosti, aby se stala hvězdami. (Petrásek et al., 2009).

O tom, kdy byla Evropa relativně „živým“ tělesem můžeme jen spekulovat. Přesto zde mohl panovat život, který byl následně vytlačen do spodních pater evropského oceánu.

4.3 Zdroje energie pro život

Mezi základní zdroje energie na Europě patří energie z hlubin, radiace a tzv. alternativní zdroje energie.

4.3.1 Energie ze dna oceánu

Důležitým faktorem pro život je tepelná a chemická instabilita. Tedy je důležité, aby docházelo k neustálému promíchávání, musí být tedy dominantní konvektivní proudění. Pokud by převažoval přenos kondukcí, což se u Europy nepředpokládá, nemohl by tam život dobře fungovat.

Na Zemi je základním zdrojem energie organismů fotosyntéza, ta bohužel na Europě neprobíhá. Nicméně, i pozemský život není všude příhodný pro vznik fotosyntézy. Existuje malá skupina organismů, které pro svou existenci využívají chemické reakce, kdy z látek anorganických dělají látky organické. Tyto organismy nazýváme, jako chemolitotrofní (Petrásek et al., 2009).

Na Zemi jsou základem funkce organismů redoxní reakce, v případě Europy tomu nebude patrně jinak. Organismy tedy budou vyhledávat dva typy chemických látek. První budou látky, které nahradí kyslík. Druhým redukované látky, které by měly sloužit, jako zdroj energie metabolismu (McKinnon et al., 2001).

Mezi redukované látky patří organické sloučeniny, vodík, sulfan, sulfidy, amoniak či některé sloučeniny železa a manganu. Redukované látky potom můžeme hledat v nevětrálních vyvěřelinách a oblastech s hydrotermální činností. Nelze ani vyloučit přítomnost těchto látek v klatrátech (Petrásek et al., 2009).

Naopak mezi látky oxidované řadíme sírany, síru, oxidovaný uhlík v podobě uhličitánů nebo oxidu uhličitého. Zdrojem těchto látek by mohl být samotný evropský oceán.

Pokud shrneme dosavadní poznatky, tak v evropském oceánu bychom mohli očekávat metanogenní organismy. Jejich výskyt je poměrně široký, jsou schopni odolávat

extrémním podmínkám, díky výborné přizpůsobivosti. Metanogenové dokážou z oxidu uhličitého a vodíku vytvořit metan a vodu. Metan mohou dále měnit na organické sloučeniny. Ke svému životu nepotřebují kyslík, tudíž jim nevadí anoxické podmínky. Oblasti s hydrotermální činností jsou právě na vodík a oxid uhličitý bohaté, tudíž by se mohly stát zdrojovými oblastmi těchto organismů. Samotná existence metanogeneze je ve vědeckém světě poměrně hojně přijímaná, nicméně dosud není jasné, zda se spíše metan ukládá a akumuluje, nebo se naopak biochemicky rozkládá (McCollom, 1999).

Dalšími možnými organismy jsou bakterie, jež ke své existenci využívají anaerobní oxidaci metanu. Tyto bakterie oxidují metan ze dna bez pomoci kyslíku. Roli kyslíku nahrazuje totiž síran, respektive síranový aniont. Bakterie žijí v hlubších vrstvách Černého moře a tvoří komínovité struktury (McKinnon et al., 2001).

Případné bakteriální organismy by mohli být doprovázeny tzv. organotrofy, což jsou organismy, které plní funkci dekompozitorů, popřípadě dravých bakterií. Svou potravu zpracovávají fermentací, tedy rozkladem bez přítomnosti vnějšího oxidačního činidla, popřípadě anaerobní respirací (Siegel, 2002).

4.3.2 Radiace

Profesor Christopher F. Chyba zjistil, že když částice radiačního pásu narazí do ledovce, může dojít k mikroskopickému ohřátí na vysokou teplotu, samozřejmě se jedná o značně malé plochy, nicméně i krátkodobé intenzivní ohřátí může vést ke vzniku chemických reakcí.

Radiolýzou vody vzniká na povrchu poměrně široké spektrum látek (peroxid vodíku, síra, kyslík). Tyto látky se částečně vytratí, díky nízké gravitaci do meziplanetárního prostoru. Podle nových průzkumů mohou tyto látky tvořit až 7% povrchové vrstvy ledu. Pokud bychom do toho započítali i klatráty, tak se budeme pohybovat mezi 12-58% (Hand et al., 2006).

Ovšem ionizující záření, nemusí rozkládat pouze anorganické látky. Rozpadem molekul karbonátů může kupříkladu vznikat formaldehyd.

Nastává zde otázka, zda by mohli radiogenní látky proniknout, až k evropskému oceánu? Ano, mohly. V případě, že by ledová krusta byla tenká a docházelo by k pravidelnému protavení zespoda na povrch. Někteří vědci se domnívají, že právě radiolýza by mohla alespoň částečně nahradit chybějící fotosyntézu.

Pokud by se dostal peroxid, až do oceánu, okamžitě by se rozpadl na vodík a kyslík. Kyslík pak může ve vodě setrvávat, jak při dně, tak obsažený v ledu. Hromadění kyslíku je bohužel omezené a vázané na pohyb ledovců, které se musí otáčet, aby docházelo ke styku mezi povrchem a oceánem (Chyba, 2001).

Dalším způsobem, jak by se kyslík mohl dostat do oceánu je radioaktivní rozpad. O přítomnosti draslíku (^{40}K) na Europě víme, jeho poločas rozpadu je 1,3 miliardy let. Ten se následně rozpadá na ^{40}Ar a ^{40}Ca . Při rozpadu dochází k uvolnění velkého množství energie, která by mohla vodu štěpit na kyslík a vodík. Radioaktivní rozpad se sice nevyrovná radiolýze, ale tvoří se přímo v oceánu, tudíž nemusí docházet k žádným složitým mechanismům. V minulosti byl rozpad radioaktivních izotopů hojnější než dnes (Chyba et al., 2001).

Přestože známe mechanismy, jak mohl vzniknout kyslík na Europě, tak bohužel nevíme, kolik ho tam je.

V zásadě jsou dvě teorie. První tvrdí, že kyslíku bude málo, avšak pro některé druhy bakterií by to mohlo stačit. Druhá se pak opírá o fakt, že by k okysličení mohlo docházet, díky otáčení ledovců. Nakonec by organismy omezoval deficit látek redukovaných.

4.3.3 Alternativní zdroje energie

S možností alternativních zdrojů energie přišli poprvé astrobiologové Dirk Schulze-Makuch a Louis Irwin. Jde o specifické zdroje energie, které jsou často vázané na jeden specifický ukazatel. Mezi alternativní zdroje energie řadíme magnetotrofii, termotrofii, kinetotrofii, osmotrofie a temnou fotosyntézu

4.3.3.1 Magnetotrofie

Magnetotrofie je proces, při které dochází k využívání změn magnetického pole k tvorbě energie. Jak již víme, tak Europa má slabé magnetické pole. Vzniká důsledkem magnetické indukce, kdy proměnlivé magnetické pole působí na vodič a vzbuzuje v něm el. proud. Za vznikem magnetického pole Europy stojí měsíc Jupiter, který díky rychlé rotaci (1 otočení kolem své osy za méně než 10 hodin) vytváří kolem sebe silné magnetické pole. Magnetosféra Jupitera ovšem nepůsobí na Europu rovnoměrně. Strana přivrácená k Jupiteru je vystavována větší intenzitě magnetického pole (v průměru 450 nT). Nicméně, síla magnetosféry Jupitera se v průběhu cyklu mění, proto se vědci domnívají, že organismy využívající magnetotrofii by zde žít nemohly (Schulze-Makuch et al., 2001).

4.3.3.2 Termotrofie

Termotrofie funguje na základě rozdílných teplotních gradientů, při nichž dochází k tvorbě energie. Nutné je mít pouze dva zdroje s rozdílnou teplotou. Organismy, které využívají tohoto mechanismus, nazýváme termotrofní. Za ideální místo pro termotrofy bychom mohli označit místa s hydrotermální činností (Petrásek et al., 2009).

4.3.3.3 Kinetotrofie

Proces, při kterém organismy využívají kinetickou energii pro tvorbu molekul ATP (Adenosintrifosfát). Organismy, jež využívají kinetotrofii označujeme jako kinetotrofy. V oceánu by patrně využívaly energii vodního proudu.

4.3.3.4 Osmotrofie

Způsob příjmu potravy ve formě roztoků celým povrchem těla. Pro fungování osmotrofie je důležité koncentrační rozhraní mezi dvěma prostředími. Na hranici těchto dvou prostředí se nachází buňka, která jednou svou částí je ponořena do hustého roztoku, který se tlačí dovnitř buňka, naopak na druhé straně dochází k jeho vytlačení ven do mořské vody. V evropském oceánu by vznikalo koncentrační rozhraní zřejmě mezi vrstvami s rozdílnou salinitou. Aby osmotrofové, organismy využívají osmotrofii, přeživaly, musel by být koncentrační předěl mezi vrstvami poměrně vysoký (Schulze-Makuch et al., 2001).

4.3.3.5 Temná fotosyntéza

Proces probíhající v oceánech, kam již nedopadá radiální záření. Temná fotosyntéza byla poprvé pozorována roku 2003 u pobřeží Mexika týmem z univerzity v Britské Kolumbii. V hloubce přes 2 kilometry byla nalezena primitivní forma fotosyntetizujících sírných bakterií, která produkuje jako odpadní látku sloučeniny síry. Těmto organismům vystačí energie jednoho fotonu až na 8 hodin. Zdrojem energie mohou být podmořské vývěry, kdy dochází k ohřevu hornin a následnému elektromagnetickému záření. Klíčovým faktorem pro temnou fotosyntézu je tedy teplota (Hart et al., 2003).

Pokud nemá těleso/látka teplotu nula kelvinů, vydává vždy nějaké množství elektromagnetického záření, které může, ale nemusí být ve viditelném spektru světla.

Fotony se mohou dále uvolňovat při formaci bublin, chemických reakcích a praskání krystalů.

V případě, že by měl evropský oceán dostatek geotermální energie, mohly by tam organismy podobné fotosyntetizujícím sírným bakteriím žít.

4.4 Prostředí života na Europě

Život na Europě má k dispozici několik prostředí pro vznik života. Pro přehled rozebereme čtyři základní (povrch, rozhraní mezi ledovou krustou a oceánem, horní patra oceánu, dno oceánu).

4.4.1 Povrchová vrstva

Povrch Europy je pro organismy nehostinnou oblastí, jelikož je vystavován radiaci a nízkým teplotám. Nicméně, několik metrů pod povrchem je teplota a radiace pro přežití mnohem snesitelnější. Do této hloubky by mohlo stále pronikat světlo. Organismy by patrně obývaly trhliny mezi dvojitými hřebeny (přítomnost vyvěrající vody). I přesto se povrch Europy nejeví, jako vhodné místo pro život (Greenberg et al., 2002).

Podle Greenberga by teploty -20°C (limit pro pozemský život) bylo dosaženo, až v hloubce 1,5 km, pokud by byl gradient ledu cca. $0,1^{\circ}\text{C/m}$. Vrstvy evaporitů a regolitů by

mohly tuto hranici posouvat nepatrně výš. Greenbergova teorie možného života na povrchu Evropy vychází z faktu, že by se na povrch musela neustále dostávat ohřátá voda, která by nestačila mrznout a mohla se tak stát příhodným prostředím pro život. Kromě nestabilní teploty by bakteriím znepríjemnil existenci i přítomný peroxid vodíku (Greenberg et al., 2002).

Kromě Greenberga o životě na povrchu Evropy uvažovala i dvojice Gaidos a Nimmo. Svůj výzkum zaměřili na postranní posuny tzv. strike slip motion. Teplo vznikající třením by ohřívalo plastický led, mohla by případně vzniknout kapalná voda. V tomto „ohřátém stavu“ by mohl led/voda zůstat poměrně dlouhou dobu, a stát se tak vhodným prostředím pro život (Gaidos et al., 2000).

Lunine a Lorenz zastávají teorii, že by fotosyntéza na povrchu Evropy mohla být. Předpokládají, že by světlo dodané od Slunce mohlo pronikat do poměrně velké hloubky (řádově až první desítky metrů). V případě, že by v dané hloubce existovala izolační vrstva a slapový ohřev, mohla by se zde udržovat kapalná voda, respektive by mohlo dojít ke vzniku ostrovních oblastí, kde by se uplatnila fotosyntéza. Nicméně, existenci fotosyntézy na Evropě je spíše záležitost dob minulých, pokud vůbec (Lunine et al., 1997).

4.4.2 Rozhraní mezi ledovou krustou a oceánem

Podle Pappalarda by se mohla tato zóna právě stát vhodným prostředím pro život. Teploty zde budou patrně vyšší než -20°C . Hlubší konvektivní led by měl v celém objemu relativně vysokou teplotu (kolem bodu tuhnutí) (Pappalardo et al., 1999).

Led by byl spíše heterogenní a složený z různých zón (zóna s dominancí diapirismu, zóna klatrátů, zóna kapalné solánky). Tyto zóny by mohly pomáhat k akumulaci tepla, jelikož jde o látky s lepšími izolačními vlastnostmi (Prieto-Ballesteros et al., 2005).

Organismy zde žijící by měly na rozdíl od těch žijících v oceánu mnohem větší přísun látek vhodných pro existenci. Samotná existence pevného substrátu je pro organismy bezesporu velkou výhodou.

4.4.3 Horní patra oceánu (pelagiál)

Kupodivu pelagiál neboli otevřený oceán bude na život spíše chudý. Zdroje energie s povrchu se sem dostanou minimálně, a geotermální činnosti se projevuje pouze u dna. Pokud bychom zde nějaké organismy našli, patrně by se nechaly unášet proudy mezi jednotlivými rezervoáry příznivého prostředí, podobně jako plankton.

Dále by organismus mohly využít stratifikace oceánu, přesouvaly se mezi vrstvami redukované (potrava) a oxidované (kyslík) zóny. Podobný způsob existence využívaly silurští graptoliti (Petrásek et al., 2009).

4.4.4 Dno oceánu

Na dně eurospkého oceánu lze očekávat, že bude diverzita největší, co se týče organismů a různých prostředí. Předpokládá se, že by zde mohly žít organismy podobní destruentům.

V okolí hydrotermálních zón lze očekávat společenstva podstatně bohatší, využívající chemické látky a energii z nitra planety. Kvantita i kvalita života bude souviset jednak s intenzitou geologické činnosti, jednak s dostupností oxidantů v okolní mořské vodě. Koncentrace tepelné energie bude vytvářet vhodné podmínky i pro termotrofy a geotermální fotosyntézu (Petrásek et al., 2009).

5 EUROPA A JEJÍ VÝZKUM V BUDOUCNOSTI

V minulosti nám nejvíce informací o Europě přinesla sonda Galileo, která vyvolala ve světě exobiologie mnoho otázek, hlavně co se týče ledové krusty tvořící povrch. Dnes se již plánují nové mise k tomuto ledovému měsíci. Příkladem můžeme uvést europa orbiter, JIMO, jovian Europa orbiter, Europa lander a Europa ocean explorer.

5.1 Europa orbiter

NASA začala na misi Europa orbiter pracovat hned po misi Galileo. Sonda měla po dobu měsíce obíhat Europu a zkoumat její povrchovou kůru radarem a výškoměrem. Sonda měla odstartovat v roce 2008, ale z důvodu nedostatku financí byl start odložen. (Petrásek et al., 2009).

5.2 JIMO (Jupiter icy moons orbiter)

Velká automatickou loď o délce téměř 60 metrů, poháněná malým jaderným reaktorem a disponující zdroji energie i pro náročné aparatury. Byla by vybavena iotovým motorem, jehož výhodou je dlouhá výdrž. Mohla by se tedy přemisťovat z orbity jednoho měsíce ke druhému, a to zvnějšku dovnitř, od Callisto přes Ganyméd až k Europě. Zatímco operace u prvních dvou těles nejsou příliš riskantní, u Europy by se JIMO střetl s nebezpečnou radiací, která by dříve či později zničila jeho elektroniku (Petrásek et al., 2009).

Výsledkem jeho činnosti by bylo důkladné zkoumání složení povrchu a radarové vlny by umožnily proniknout pod povrch ledové krusty. Neplanuje ovšem shoda, zda by radar ledem pronikl až k oceánu. Laserový výškoměr by měl zkoumat výškové rozdíly na povrchu a rozsah slapových pohybů. Sonda by dokonce mohla nést malý lander pro přímý výzkum ledového povrchu.

Předběžný termín startu byl plánován na rok 2017. Bohužel v letech 2005 a 2006 byly práce na projektu zastaveny kvůli nedostatku financí..

5.3 Jovian Europa orbiter

Mise plánovaná Evropskou kosmickou agenturou (ESA) by se skládala z přenosové stanice na orbitě Jupitera, evropského orbiteru a případně miniaturního landeru.

Europský modul bude fungovat jen asi 60 dní orbita Europy, je totiž kvůli slapovým silám Jupitera nestabilní. Před zánikem vyšle data na přenosovou stanici pohybující se v bezpečnější oblasti, která je pak odvysílá na Zemi (Petrásek et al., 2009).

5.4 Europa Lander

Landery by na Europě zkoumaly složení ledu, pátraly po stopách života a zkoumaly seismickou aktivitu.

Jako místo přistání by byly nejvhodnější oblasti, kde podpovrchová voda nedávno vnikla na povrch. Vzhledem k nejasným výkladům geologie však není zřejmé, jaké útvary jsou v tomto směru nejvhodnější, proto by ještě před landerem musely Europu předběžně zkoumat orbitální sondy. Detekce organismů by však mohla být značně obtížná.

Sestrojení landeru pro Europu nebude snadné, protože nemá atmosféru, tudíž musí být brzdění zajištěno výhradně s pomocí raket, což zvyšuje náklady a zároveň snižuje možnou hmotnost zařízení.

5.5 Europa ocean explorer

Sonda, která by nesla zařízení jménem kryobot – jakýsi vrták do ledu. Na bázi ledovce by případně vypustil hydrobota (ponorka). Jde spíše o technologii, která je ve zkušební fázi. Provádějí se cvičné mise, při nich by prototyp hydrobota prozkoumal některé z podledových jezer v Antarktidě, která se oceánu Europy velmi podobají.

6 ZÁVĚR

Podle získaných dat z kosmických družic nemůžeme říct, že by s jistotou na Europě panoval život. Přítomnost biogenních prvků nelze vyloučit, nabízí se tedy otázka, zda jsou tyto prvky v dostatečném množství.

Zásadnějším a často diskutovaným problémem je oceán pod povrchem Europy. Existuje několik teorií, které lze v zásadě rozdělit na dvě skupiny. První podporuje teorii silné ledové krusty, druhá naopak teorii tenké krusty. Nevýhodou těchto dvou teorií je, že se částečně vylučují, tudíž nelze říct, že by pravda mohla být někde uprostřed. Můžeme předpokládat, že jedna ze zmíněných teorií bude blíže pravdě.

Pokud se dokáží astrobiologové jednotně shodnout, mohlo by to značně pomoci při rozluštění hádanky kolem života na Europě. Tomu by především mohly pomoci budoucí kosmické výpravy, které by kromě klasického pořizování snímku, přistály i na povrchu měsíce a odebraly vzorky hornin. Pořízené vzorky z povrchu Europy by mohlo osvětlit geologické pochody, které jsou také předmětem sporů a diskuzí.

Také se nabízí otázka, co bude hlavní zdrojem energie na Europě? Nejspíše jí bude oceán ukrytý pod ledovou vrstvou. Na základě toho můžeme říct, že pokud lze očekávat na Europě život, tak bude v oceánu. Důvodem jsou hlavně nehostinné podmínky na povrchu (magnetické pole, radiace, nízké teploty) a předpoklad, že život podobný tomu našemu, začal v oceánu.

7 SEZNAM LITERATURY

Petrásek, T., Duszek, I., (2009): Vzdálené světy I. Triton, 169-234.

Novák, J. A., (2009): Život ve vesmíru. Daranus, 218-227.

Ward, P., (2005): Život, jak ho neznáme. Viking, 224- 242.

Pappalardo, R.T. et al., (1999): Does Europa have a subsurface ocean? Evaluation of the Geological Evidence. *J. Geophys. Res.*, 104, 24,015-24,055.

McKinnon, W. B., Shock, E. L., (2001, 12-16 March): Ocean Karma: What Goes Around Comes Around on Europa. In: 32nd Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 12-16, 2001, Houston, Texas, abstract no. 2181.

Greenberg, R., Tucte, B. R., Geissler, P., Hoppa, G. V., (2002): Europa's Crust and Ocean: How Tides Create a Potentially Habitable Physical Setting. In: Hornech, G., Baumstark-Khan, Ch. (eds.): *Astrobiology. The quest for the conditions of life. Physics and astronomy online library.*

Pappalardo, R. T., Head, J. W., Greely, R., (1999): The Hidden Ocean of Europa. *Scientific American.*

Lipps, J. H., Delory, G., Pitman, J., Rieboldt, S., (2004): Astrobiology of Jupiter's Icy Moons. In: *Proceedings of SPIE. Vol. SPIE-5555, 78-92.*

Sarid, A. R., Greenberg, R., Hoppa, G. V., Tufts, B. R., Geissler, P., (2002, 11-15 March): Polar Sander on Europa: Results from a Survey of Strike-Slip Faults. *Lunar and Planetary Science XXXIII, Houston, TX, United States.*

Geissler, P.E. (2004, 6-9 February): Origin of Chaos Terezin. In: *Workshop on Europa's Icy Shell: Past, Present, and Future, Houston, Texas, abstrakt no. 7050.*

Prieto-Ballesteros, O. Kargel, J. S., Fernández-Sampedro, M., Selsis, F., Martinez, E. S., Hogenboom, D. L., (2005): Evaluation of the possible presence of clathrate hydrates in Europa's icy shell or seafloor. *Ikarus, 177 (2), 491-505.*

Chyba, C. F., Philips, C. B., (2001, 12-16 March): The Surface-Subsurface Exchange and the Prospects for Life on Europa. In: 32nd Annual Lunar and Planetary Science Conference, Houston, Texas, abstrakt no. 2140.

Marion, G. M., Fritsen, Ch. H., Eicken, H., Payne, M. C., (2003): The Search for Life on Europa: Limiting Environmental Factors, Potential Habitats, and Earth Analogues. *Astrobiology, 3 (4), 785-811.*

O'Brien, D. P., Geissler, P., Greenberg, R., (2001): A Melt-through model for Chaos Formation on Europa, *Ikarus, 156 (1), 152-161.*

- Mitri, G., Showman, A. P., (2005): Convective-conductive transitions and sensitivity of a convecting ice shell to perturbations in heat flux and tidal-heating rate: Implications for Europa. *Icarus*, 177 (2), 447-460.
- Nimro, F., Giese, B., Pappalardo, R. T., (2003): Estimates of Europa's ice shell thickness from elastically supported topography. *Geophysical Research Letters*, 30 (5), 37-41.
- Prieto-Ballesteros, O., Kargel, J. S., (2004): Thermal state and complex geology of a heterogeneous salty crust of Jupiter's satellite, Europa. *Icarus*, 173 (1), 212-221.
- Zolotov, M. Y., Shock, E. L., (2004): A model for low-temperature biogeochemistry of sulfur, karbon, and iron on Europa. *Journal of Geophysical Research. E. Planets*, 109 (E6), 5.
- Melosh, H. J., Ekholm, A. G., Showman, A. P., Lorenz, R. D., (2004): The temperature of Europa's subsurface water ocean. *Icarus*, 168, 498-502.
- Price, B. P., (2002): Life in Solid Ice on Earth and Other Planetary Bodies. In: Norris, R., Stootman, F. (eds.): *Bioastronomy 2002: Life Among the Stars*, Proceedings of IAU Symposium 213.
- Lowell, R. P., Dubiose, M., (2005): Hydrothermal Systems on Europa: *Geophysical Research Letters*, 32 (5).
- Lunine, J. I., Lorenz, R. D., (1997, 17-21 March): Light and Heat in Fracka on Europa: Implications for Prebiotic Synthesis. In: 28th Annual Lunar and Planetary Science Conference.
- McCollom, T., (1999): Methanogenesis as a potential source of chemical energy for primary biomass production by autotrophic organisms in hydrothermal systems on Europa. *Journal of Geophysical Research*, 104 (E12), 30,729.
- Siegel, L. J., (2002): Café Methane. *Astrobiology Magazine*.
- Hand, K. P., Carlson, R. W., Chyba, C. F., Cooper, J. F., (2006): Clathrate Hydrates of Oxidants in the Ice Shell of Europa. *Astrobiology*, 6(3), 463-482.
- Schulze-Makuch, D., Irwin, L. N., (2001): Alternative Energy Sources Could Support Life on Europa. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 82 (13), 150.
- Gaidos, E. J., Nimro, F., (2000): Tectonics and water on Europa. *Nature*, 405 (6787), 637.