

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Geografie a kartografie



Václav Kolář

**VZESTUP HORNÍ HRANICE LESA JAKO DŮSLEDEK RŮSTU
TEPLOT A ZMĚN VYUŽITÍ PŮDY**

**TREELINE RISE AS A CONSEQUENCE OF INCREASING TEMPERATURE
AND LAND-USE CHANGE**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Václav Treml, Ph.D.

Praha 2014

Zadání bakalářské práce

Téma práce: Vzestup horní hranice lesa jako důsledek růstu teplot a změn využití půdy

Cíle práce

- 1) Zpracovat rešerši na téma „dynamika horní hranice lesa a faktory, které ji ovlivňují“.
- 2) Vytvořit databázi vzestupů horní hranice lesa s následujícími atributy: poloha, druh dřeviny, velikost vzestupu, teplotní trend, trend v land-use.
- 3) Databázi statisticky vyhodnotit.

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Metody: rešerše, detekce trendů z klimatických dat (CRU)

Postup: 1) zpracovat rešerši; 2) připravit databázi pomocí rešerše ve SCOPUS, WOS, Google; 3) pro zájmové lokality zjistit teplotní trendy pro příslušné období z gridových teplotních databází (přístup přes KNMI Climate Explorer); 4) databázi vzestupů hranice lesa statisticky analyzovat za účelem zodpovězení, zda je vzestup řízen spíše teplotně nebo změnou land-use.

Datum zadání: 1.11. 2013

Jméno studenta: Václav Kolář

Podpis studenta:.....

Jméno vedoucího práce: Václav Tremel

Podpis vedoucího práce:

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 20.05.2014

Podpis:

Poděkování:

Děkuji svému školiteli Mgr. Václavu Tremlovi, Ph.D za podnětné připomínky, cenné rady a především za trpělivé vedení této práce

Vzestup horní hranice lesa jako důsledek růstu teplot změn využití půdy

Abstrakt

Postup horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek je pozorován u většiny evropských pohorí. Mnoho autorů přičítá postup horní hranice lesa hlavně rostoucím teplotám, jiní zase snižujícímu se antropogennímu vlivu. Cílem práce bylo popsat dynamiku horní hranice lesa a faktory, které ji ovlivňují a dále na základě databáze případových studií se zabývat otázkou, zda je vzestup horní hranice lesa řízen spíše růstem teploty nebo změnou využití půdy. Na základě zpracované databáze bylo zjištěno, že velikosti vzestupů hranice lesa v Evropě se pohybovaly od -0,2 do 1,6 m.rok⁻¹. Nejrychleji stoupala horní hranice lesa v Rakouských Centrálních Alpách, naopak v Ukrajinských Karpatech byl zaznamenán ústup. Dále bylo zjištěno, že vzestup horní hranice lesa se shoduje s rostoucími teplotami během zimního období. Vzestup horní hranice lesa je v polárních oblastech přičítán hlavně rostoucí teplotě a zvyšujícím se srážkám, zatímco v lokalitách ovlivněných člověkem je připisován rostoucí teplotě v kombinaci se snižujícím se antropogenním vlivem.

Klíčová slova: horní hranice lesa, vzestup, antropogenní vliv

Treeline rise as a consequence of increasing temperature and land-use change

Abstract

Treeline advance to greater altitude is observed in the majority of European mountains. Many authors have attributed treeline advance to increasing temperature, others to decreasing anthropogenic influence. The aim of the thesis was to describe dynamics of treeline and influencing factors. Based on newly created database of case studies I asked, whether the treeline advance is controlled by increasing temperature or by land-use change. My treeline database documented, that treeline advance in Europe ranged from -0,2 to 1,6 m.y⁻¹. Treeline was advancing most quickly in the Austrian Central Alps, conversely treeline in Ukraine Carpathians revealed retreat. Furthermore, it was found that treeline rise coincides with increasing winter temperatures. While the advance of northern treelines without human impacts is attributed to increasing temperatures and precipitation, remaining areas showed treeline advance in consequence of temperature increase and decreasing anthropogenic influence.

Key words: treeline, rise, human impact

Obsah

1. Úvod	8
1.1. Definice horní hranice lesa.....	9
1.2. Faktory určující pozici horní hranice lesa	11
1.3. Faktory ovlivňující postup horní hranice lesa	13
1.4. Změny polohy horní hranice lesa v pohořích Evropy – regionální přehled	18
1.4.1. Ural.....	18
1.4.2. Severní Fennoskandinávie.....	19
1.4.3. Skandinávské pohoří	20
1.4.4. Krkonoše a Hrubý Jeseník.....	21
1.4.5. Karpaty	22
1.4.6. Alpy.....	23
1.4.7. Apeniny	25
1.4.8. Pyreneje.....	25
2. Metodika.....	27
3. Výsledky	29
4. Diskuze	36
5. Závěr	39
6. Seznam použité literatury	40
7. Přílohy	44

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schematické znázornění ekotonu horní hranice lesa s použitým názvoslovím (Körner a Paulsen 2004)	10
Obrázek 2: Tři úrovně mechanismů kontrolujících tvar a dynamiku horní hranice lesa a faktory a podmínky, které určují, jak tyto mechanismy fungují (Harssh a Bader 2011)	14
Obrázek 3: Mapa zájmových lokalit se vzestupy horní hranice lesa	35

Seznam tabulek

Tabulka 1: Vlastnosti horní hranice lesa v Evropě	31
Tabulka 2: Teplotní trendy zájmových lokalit	33
Tabulka 3: Hodnoty korelačních koeficientů mezi vzestupem horní hranice lesa a jednotlivými teplotními trendy počítaných na 5% hladině významnosti	34

1. Úvod

Horní hranice lesa je pravděpodobně nejznámější a nejvíce studovanou distribuční hranicí stromů ze všech (Körner 2012). Jedná se o jednu z nejzřetelnějších vegetačních hranic. Ve skutečnosti však není přechod mezi nejvyšším zapojeným lesem a bezlesou alpskou vegetací jednotnou linií, ale spíše přechodovou zónou vyznačující se snižující hustotou a výškou stromů směrem k bezlesí (Körner a Paulsen 2004).

Snižující se teplota s rostoucí nadmořskou výškou nebo zeměpisnou šířkou má za následek omezení růstu stromů (Holtmeier 2009). Teplota je proto široce uznávaným primárním faktorem kontrolující polohu horní hranice lesa (Körner 2007b). Poloha je spojována s průměrnou půdní teplotou vegetačního období pohybující se překvapivě v úzkém rozsahu mezi 5° a 8°C (Körner a Paulsen 2004).

Podle Holtmeier a Broll (2005) by mělo globální oteplování napomoci k postupu horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek a zeměpisných šířek. Globálně zvyšující se průměrná teplota napříč minulým stoletím a následný postup horní hranice lesa, však není celosvětovým fenoménem, přesto postup do vyšších nadmořských výšek převažuje. (Holtmeier a Broll 2007, Harsch et al. 2009). Nízká teplota není jediným faktorem ovlivňující polohu a postup horní hranice lesa. Důležitou roli zde hraje také topografie, vlastnosti jednotlivých druhů stromů, vlastnosti půdy a místní historie (Holtmeier 2009).

Podstatným faktorem ovlivňujícím dynamiku a polohu horní hranice lesa jsou však také lidské zásahy (Gehrig-Fasel et al. 2007). Zejména klesající intenzita zemědělských aktivit má podle některých autorů významný vliv na vzestup horní hranice lesa (Sitko a Troll 2008, Van Bogaert et al. 2011). Cílem mé bakalářské práce je proto syntéza hlavních faktorů ovlivňujících změny polohy horní hranice lesa na příkladu evropských pohoří. Dílčím cílem bylo vytvořit databázi vzestupů horní hranice lesa v Evropě s následujícími atributy: poloha, druh dřeviny, velikost vzestupu, teplotní trend, trend v land-use a tuto databázi následně statisticky vyhodnotit a analyzovat za účelem zodpovězení otázky, zda je vzestup řízen spíše teplotně nebo změnou land-use.

1.1. Definice horní hranice lesa

Horní hranice lesa je definována jako přechodová zóna (ekoton) sahající od horního limitu zapojeného lesa do nejvyšších roztroušených a obvykle zakrslých jedinců stromových druhů (Holtmeier a Broll 2009). V samotné přechodové zóně (treeline ecotone) lze vymezit tři linie (obrázek 1). Dolní hranici ekotonu tvoří horní limit zapojeného lesa (timberline), vyznačující se většinou postupným snižováním výšky stromů a otevíráním zápoje, nejvyšší hranice je tvořena linií nejvyššího výskytu stromových druhů (tree species line) a střední pozici mezi těmito hranicemi zastává horní hranice lesa (treeline), charakterizována jako linie spojující nejvyšší plošky lesa složených ze stromů alespoň 3 m vysokých v daném svahu nebo v sérii svahů s podobnou orientací (Körner 1998).

Strom, který je podle Körnera (2012) definován jako vzpřímená dřevina s dominantním nadzemním kmenem dosahující výšky alespoň 3 m, hraje důležitou roli v definici horní hranice lesa. Mnoho definic se opírá o minimální výšku stromu nebo velikost zápoje. Minimální výška stromu a velikost zápoje se však liší podle každého autora a pohybuje se mezi 2 až 8 m u minimální výšky a 30 až 50 % u plochy zápoje. Minimální výška stromu jako kritérium je také jinak chápáno, pokud se v hranici lesa vyskytují různé druhy stromů. Například v severní Skandinávii je u břízy pýřité (*Betula tortuosa*) vyžadována výška 2,5 m zatímco u borovice lesní (*Pinus sylvestris*) alespoň 5 m. V horstvech mírného pásu se zdá být minimální výška stromu 2 m jako adekvátní ke klimatickým a ekologickým situacím (Holtmeier 2009). Podle Holtmeira (2009) by měla být výška určující strom vyšší než průměrná mocnost sněhové pokrývky daného místa, jelikož vyšší stromy vyčnívající nad sněhovou pokrývkou jsou více vystaveny drsným klimatickým podmínkám než menší jedinci, kteří jsou sněhem poměrně dobře chráněni.

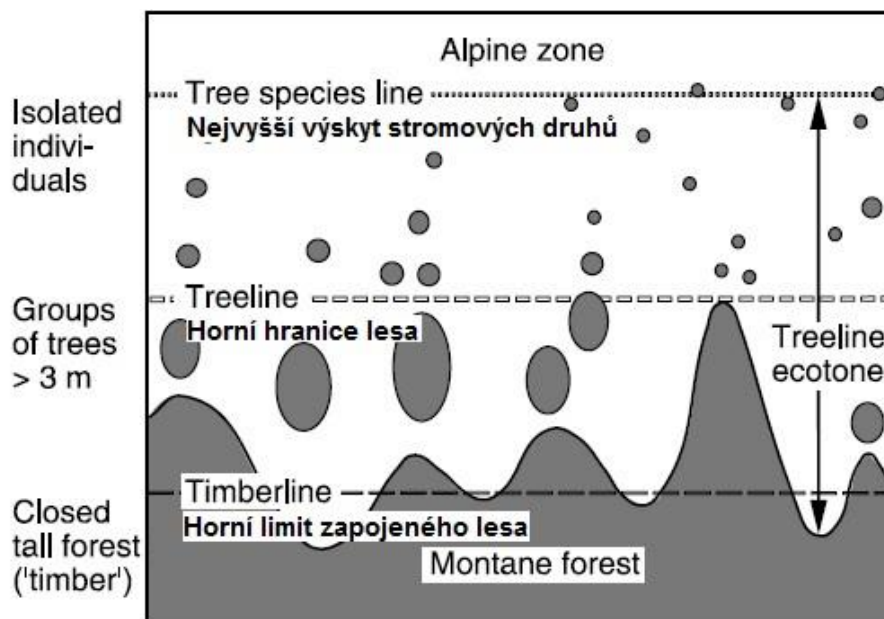
Horní hranice lesa se liší jak v šířce, tak v charakteru přechodové zóny. V subarktických oblastech, kde se horní hranice lesa vyskytuje v poměrně nízkých výškách, může být ekoton široký desítky až stovky kilometrů, naopak v horských oblastech šířka ekotonu obvykle nepřesahuje několik stovek metrů (Holtmeier a Broll 2009). V rámci horní hranice lesa lze rozpoznat globálně vyskytující se 4 různé formy ekotonu (Harsch a Bader 2011):

- Rozptýlený, je charakterizován postupným snižováním výšky a hustoty stromů směrem k bezlesí. Vyskytuje se jak v alpínské tak polární horní hranici lesa.

- Ostrý, je charakterizován zapojeným lesem vyšším než 3 m přímo sousedícím s nízkou alpskou vegetací. Výška stromů a stejně tak hustota se proto rapidně mění.
- Ostrovní, je charakterizován ostrůvky stromů nad zapojeným lesem.
- Klečový (krumholz), je charakterizován zakrslými nebo deformovanými dřevinami tvořícími ostrůvky nad vzpřímeným lesem.

Horní hranici lesa lze také rozlišit na 4 různé typy na základě faktorů, které je ovlivňují. Jedná se o orografickou, edafickou, antropogenní a klimatickou horní hranici lesa (Holtmeier a Broll 2005). Orografická horní hranice lesa se obvykle vyskytuje v hornatých oblastech. Příkré skalnaté stěny, suťové svahy, kamenná moře a lavinové dráhy mohou zamezit postupu stromů v relativně nízké výšce. Edafická horní hranice lesa je poměrně těžko rozlišitelná od orografické horní hranice lesa. Postup stromů do větších nadmořských výšek je například omezen nedostatkem půdní vlhkosti nebo půdními živinami. Antropogenní horní hranice lesa se nachází v horských oblastech ovlivněných člověkem, kde má lidská činnost například v podobě těžby dřeva nebo pastevectví za následek snížení horní hranice lesa o 150 m až 300 m. Klimatická horní hranice lesa je limitována teplotním deficitem, který zamezuje růstu stromů. Teplotní deficit je velmi komplexní faktor. Nezávisí jenom na snižující se teplotě s rostoucí výškou nebo zeměpisnou šířkou, ale také na větru, délce trvání sněhové pokrývky, půdní vlhkosti a na sezónních teplotních rozdílech (Holtmeier a Broll 2005).

Obrázek 1: Schematické znázornění ekotonu horní hranice lesa s použitým názvoslovím (Körner a Paulsen 2004)



1.2. Faktory určující pozici horní hranice lesa

Horní hranice lesa je primárně ovlivňována klimatickými podmínkami a to zejména nízkou teplotou snižující se s rostoucí nadmořskou výškou (Sveinbjörnsson 2000, Holtmeier 2009). Dříve bylo zvažováno, že pozice horní hranice lesa souvisí s 10 °C červencovou isothermou teploty vzduchu, což bylo později vyvráceno, jelikož tento předpoklad platil pouze pro Alpy a Skalisté hory a ne v globálním měřítku (Körner 1998). Körner a Paulsen (2004) ve své celosvětové studii zjistili, že průměrná teplota vegetačního období měřena v 10 cm hluboké půdě v ekotonu horní hranice lesa je 6,7°C ± 0,8 SD, kdy vyšší teplota 7 – 8 °C byla naměřena v horstvech mírného pásma, nižší teplota 5 – 6 °C v oblasti tropů a subarktické a boreální oblasti dosahují průměrné teploty 6 – 7 °C. Důvody, které vedly Körnera a Paulsena (2004) k použití půdní teploty, jsou následující:

- růst kořenů je velmi citlivý k nízkým teplotám
- půdní teplota měřena v hloubce 10 cm pod uzavřeným zápojem je poměrně dobře srovnatelná s teplotou vzduchu v korunách stromů
- základní mechanismy fyziologického růstu, které jsou rozhodující pod určitým teplotním minimem, působí jak na buněčné úrovni, tak i ve všech pletivech stejně
- teploty kořenové zóny přímo ovlivňují nadzemní metabolismus rostlin

Omezení růstu dané nízkými teplotami vysvětluje několik hypotéz. Körner (1998) je člení na hypotézy uhlíkové bilance a omezení růstu a dále hypotézy, stresové, disturbanční a reprodukční.

Hypotéza uhlíkové bilance závisí na fotosyntéze, která za nízkých teplot není schopna získat dostatečné množství uhlíku potřebné k růstu a reprodukci (Körner 1998). Teplotní optimum pro fotosyntézu u stromů v mírném pásu je okolo 20°C, pomalu klesající při 10°C a stále pozitivní chod je zaznamenán i při teplotě 5°C (Grace et al. 2002). Postupem času se však od této hypotézy začalo ustupovat, neboť není dostatek důkazů, že stromy v horní hranici lesa jsou limitovány nedostatkem uhlíku. Spíše se zdá, že stromy blízcí se svému distribučnímu limitu mají naopak zásoby uhlíku dostatečné (Körner 2007).

Hypotéza omezení růstu stojí na předpokladu, že syntetické procesy, které začleňují cukry a aminokyseliny do těla rostliny nejsou schopny za nízkých teplot fungovat, čímž je zamezeno růstu a obnově pletiv rostliny a to bez ohledu na to, zda je dostatek stavebního materiálu. Tento předpoklad se jeví jako nepravděpodobnější příčina utváření horní hranice lesa (Körner 2007).

Stresová hypotéza se zaměřuje na procesy, které narušují růst stromů. Jedná se o opakované poškození mrazem, zimní vysychání nebo fototoxické účinky po mrazu (Körner 1998). Mráz pravidelně postihuje stromy v klimatické horní hranici lesa a to jak v horách mírného pásu, tak v horách tropického pásu. Obecně se odolnost rostlin k letním mrazům zvyšuje s nadmořskou výškou (Holtmeier 2009). Mrazové poškození neohrožuje přežití stromů v ekotonu, ale může přispívat k deformovanému růstu dílčími poškozeními (Körner 1998). Na rozdíl od mrazového poškození, které je způsobeno náhlou dehydratací, zimní vysychání vychází z postupné ztráty vody zapříčiněné evapotranspirací, které se nejvíce projevuje v pozdní zimě. Ztráta vypařováním nemůže být kompenzována kvůli zmrzlé půdě a částečně i zmrzlému pletivu. Mráz a zimní vysychání způsobuje poškození hlavně jehlicím a mladým prýtlům a to zejména u semenáčků a mladých stromů (Holtmeier 2009)

Disturbanční hypotéza popisuje mechanická poškození způsobená větrem, abrazí, sněhovými závějemi, lavinami, okusem býložravců a houbovými patogeny (často souvisejícími se sněhovou pokrývkou). Následkem těchto událostí je hlavně ztráta biomasy (Körner 1998).

Reprodukční hypotéza se zabývá opylením, vývojem a rozptylem semen, klíčením a uchycením semenáčků. Všechny tyto procesy mohou omezit nebo zabránit v uchycení nových jedinců ve vyšších nadmořských výškách (Körner 1998). Přibližováním se k horní hranici lesa se počet a kvalita semen snižuje (Holtmeier 2009). Ani životaschopná semena však nejsou zárukou úspěšného založení nových jedinců, důležitou roli hrají totiž také příznivé místní podmínky pro klíčení, které je ovlivňováno mnoha faktory (teplota, půdní vláhá, vlhkost vzduchu, osvětlení, plísňe a další) a závisí také na specifických vlastnostech semen jednotlivých druhů dřevin. Důležitým faktorem úspěšné obnovy horní hranice lesa je rozptyl semen, který se děje za pomoci větru nebo zvířat. Rozptyl semen větrem je ovlivněn mnoha faktory jako váha semene, výška stromu, z kterého jsou semena uvolňována, rychlost a směr větru, topografie a rostlinný pokryv. Rozptyl semen zvířaty platí pouze pro některé druhy subalpínských borovic, které produkují těžká, téměř bezkřídlá semena rozptylována hlavně ptáky zejména ořešníky (Holtmeier 2009).

1.3. Faktory ovlivňující postup horní hranice lesa

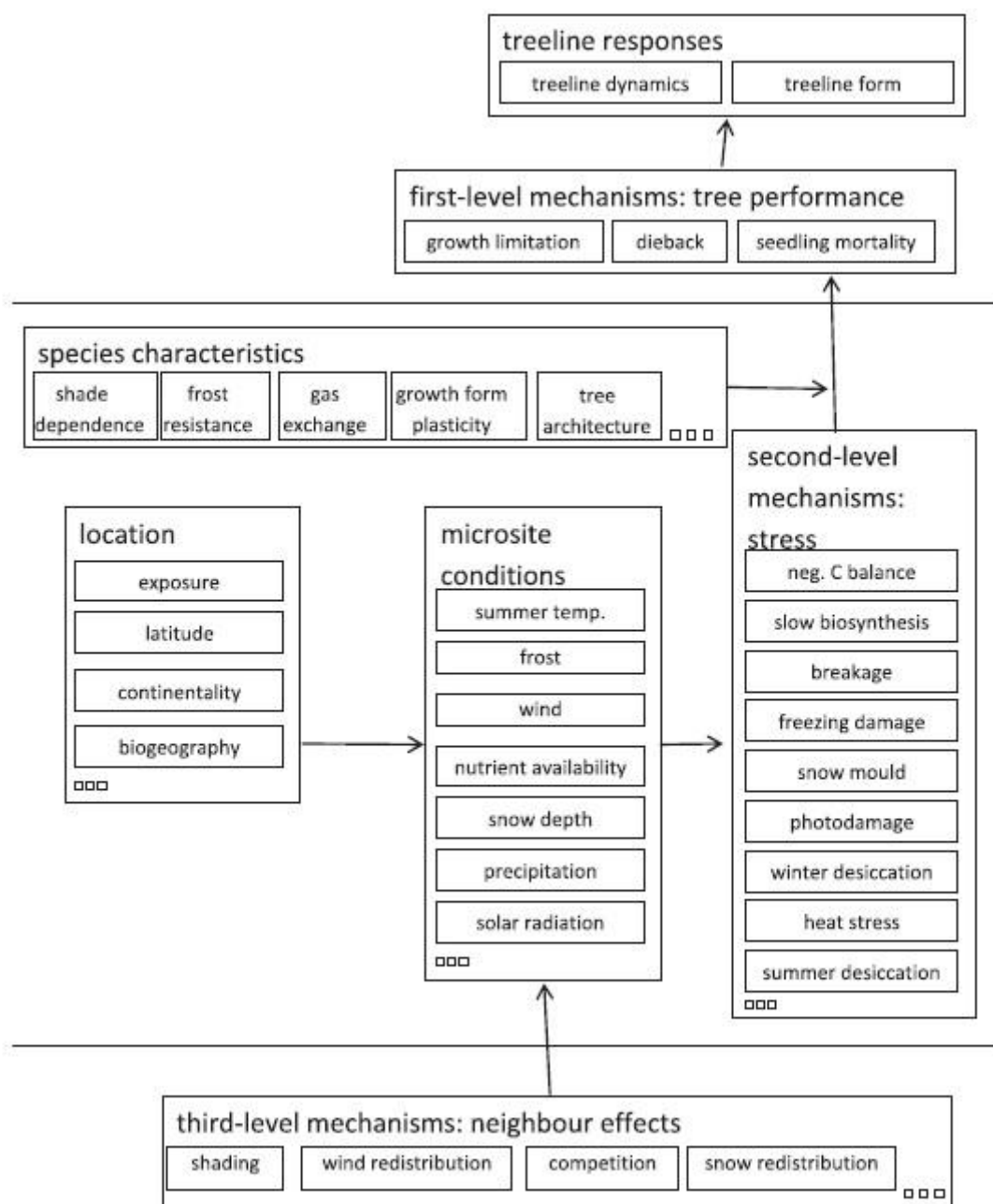
Obecně je poloha horní hranice lesa přičítána hlavně nízké teplotě. V současné době se na základě postupného zvyšování teplot očekává i reakce hranice lesa v podobě jejího vzestupu (Grace et al. 2002). Reakce výškové a polární horní hranice lesa k měnícímu se klimatu je všudypřítomná po celém světě (Holtmeier 2009). To potvrdila ve svém výzkumu i Harsch et al. (2009), která zjistila postup horní hranice lesa u více než poloviny testovaných míst a jen u minimálního počtu míst byl zaznamenán ústup. Kromě teploty, která řídí růst stromů, přežití a vývoj semenáčků, závisí postup horní hranice lesa také na topografii, ekoklimatu, historii místa, současném dopadu člověka, biotickém vlivu, vlastnostech půdy a vlastnostech dřevin tvořící horní hranici lesa. (Holtmeier a Broll 2005).

Faktory ovlivňující postup horní hranice lesa jsou silně závislé na prostorovém měřítku. Heterogenita horní hranice lesa se zvyšuje z globálního měřítka do měřítka regionálního, krajinného a lokálního (Holtmeier a Broll 2005). Proto posuzování reakce horní hranice lesa k měnícímu se prostředí (klima) v regionálním a menším měřítku vyžaduje mnohem více komplexních přístupů než v měřítku globálním. Reakce horní hranice lesa jsou různé také ve vztahu k odlišným časovým měřítkům. Krátkodobá reakce, definována jako rok nebo méně, ovlivňuje samotné stromy (fotosyntéza, alokace uhlíku atd.). Střednědobá reakce trvající několik roků nebo i několik desítek let, postihuje měnící se fyziologii stromů, šířku letokruhů, hustotu, míru přežití semenáčků a mladých stromků atd. Dlouhodobá reakce trvající desítky nebo stovky let odráží hlavně postup nebo ústup lesa (Holtmeier a Broll 2005).

Komplexní pohled na faktory ovlivňující dynamiku horní hranice lesa podle Harsche a Badera (2011) předpokládá, že dynamiku horní hranici lesa kontrolují 3 hlavní mechanismy (obrázek 2): omezení růstu (schopnost vytvářet novou biomasu), odumírání (ztráta biomasy nezpůsobující úmrtí) a mortalita semenáčků. Relativní dominance těchto tří hlavních mechanismů „první úrovně“ určuje jak tvar horní hranice lesa (rozptýlený, ostrý, ostrovní, klečový), tak její dynamiku. Tyto mechanismy jsou výsledkem různých typů fyziologických stresů nebo poškození, které jsou označovány jako mechanismy druhé úrovně např. růst může být ovlivněn nedostatečnou uhlíkovou bilancí nebo přímo nízkými teplotami omezující tvorbu pletiv; úmrtnost semenáčků může plynout ze sněžných hub, poškozením mrazem nebo letním suchem; odumírání může vyplývat z mrazového poškození, větrné abraze a poškození sněhem. Efekty druhého úrovně dále závisí na

charakteristikách zúčastněných dřevin (mrazová odolnost, fotosyntetická kapacita). Mechanismy druhé úrovně jsou dále modifikovány koexistencí se sousedními stromy, označované jako mechanismy třetí úrovně, které modifikují mikroklima a podmínky mikrostanoviště (půda), například ovlivnění rychlostí větru (zákryt, návětrí) a sněhu, stínění nebo kompeticí. Podmínky mikrostanoviště jsou dále určeny makroklimatickými a geografickými podmínkami, které závisí na poloze místa (orientace svahů, zeměpisná šířka, kontinentalita) (Harsch a Bader 2011).

Obrázek 2: Tři úrovně mechanismů kontrolujících tvar a dynamiku horní hranice lesa a faktory a podmínky, které určují, jak tyto mechanismy fungují (Harsch a Bader 2011)



Tvar reliéfu je zásadním faktorem ovlivňujícími polohu horní hranici lesa. Většina ostatních faktorů jako sluneční záření, vítr proudící blízko povrchu, teplota, půdní vláhá, délka a hloubka sněhové pokrývky a jejich výsledné účinky, distribuce půdních typů a místní podmínky jsou obecně řízeny a modifikovány tvarem reliéfu (Holtmeier a Broll 2009). Příkré skalnaté stěny, suťové svahy, osypy a lavinové dráhy mohou zamezit postupu lesa v relativně nízké výšce, zatímco osamělé stromy se mohou vyskytovat mnohem výše v příznivých místech. V případech kde orografické faktory zabraňují uchycení lesa, nebude teplejší klima příčinou postupu do větších výšek, pokud se zde budou vyskytovat suťoviště, osypy a jiné útvary zabraňující postupu. Horní hranice lesa vzniklá tímto omezením je nazývána jako orografická horní hranice lesa (Holtmeier a Broll 2005). Expozice svahu k slunečnímu záření a větru je důležitým faktorem ovlivňující výškovou pozici horní hranice lesa a distribuční znaky stromových druhů, které ji tvoří. Horní hranice lesa je obvykle výše na slunných svazích než na stinných, například v evropských Alpách je tento rozdíl okolo 100 m (Holtmeier 2009). Naopak Paulsen a Körner (2001) tvrdí, že orientace svahů nemá vliv na polohu horní hranice lesa. Slunné svahy nejsou jenom teplejší, ale také sušší než stinné svahy, což vede k odlišné druhové skladbě v závislosti na expozici. Orientace svahů má také vliv na hloubku a trvání sněhové pokrývky. Sníh se drží relativně déle pod stínícím lesním zápojem na stinných svazích, čímž se zvyšuje vlhkost a půdní vláhá (Holtmeier 2009).

Sníh je faktorem ovlivňující růst, růstové formy a distribuci stromů v horní hranici lesa. Sněhové podmínky jsou závislé hlavně na topografii. Hloubka sněhové pokrývky je nižší na návětrných svazích a konvexním reliéfu, naopak na závětrných svazích a konkávním reliéfu je vyšší. Vysoká sněhová pokrývka chrání nízkou vegetaci a tedy i semenáčky před poškozením klimatickými vlivy jakými jsou mráz, abraze ledovými krystaly, intenzivní sluneční záření a také před okusem zvířaty, zatímco mladé stromky vyčnívající nad sněhovou pokrývkou jsou vystaveny nepříznivým klimatickým podmínkám. Dalším pozitivním faktorem sněhové pokrývky je dostatek vláhá po tání sněhu, která je důležitá hlavně na velmi vysušených substrátech. Kromě efektů kladně působících na přežití semenáčků, může mít sněhová pokrývka i vliv negativní. Sníh může zkrátit vegetační období, zpozdí zvýšení půdní teploty a také způsobit mechanické poškození návějemí nebo lavinami. Velké množství sněhu může mít za následek napadení neopadavých jehličnanů sněžnými houbami, které mohou mít v některých případech rozhodující vliv na přežití stromů (Holtmeier 2009).

Díky měnícím se chemickým a fyzikálním vlastnostem patří **půda** k nejvíce komplexním místním faktorům, které hrají významnou roli v ekotonu horní hranice lesa. Nejdůležitějším faktorem půdy působícím na růst stromů je její teplota. Teplota půdy je ovlivňována mnoha faktory jako půdní textura, pórovitost, objemová hmotnost, obsah humusu, půdní vláha, tepelná vodivost, druh a struktura porostu, vystavení záření a větru, pohyb vody v půdě a délka trvání zimní sněhové pokrývky. Změny půdní teploty v kořenové zóně jsou rozhodující pro růst a přežívání stromů (Holtmeier 2009). Nízká půdní teplota zkracuje vegetační období, brání fotosyntéze, dýchání kořenů, růstu kořenů, dekompozici, příjmu živin, klíčení semen, růstu semenáčků, zrání letorostů a ukládání zásob (Holtmeier 2009). Dalšími limitujícími vlastnostmi půdy je půdní vláha a dostupnost živin (zejména dusíku), jejichž nedostatek může bránit vývoji semenáčků (Holtmeier a Broll 2007). Důležitou roli hraje také mykorrhiza. Tato symbióza mezi kořeny a houbou umožňuje stromům přijímat dostatek živin. Houby jsou také schopny metabolizovat fosfor a jiné minerály, které jsou pak stromům k dispozici. Navíc houby stimulují růst kořenů a produkují složky, které chrání kořeny před infekcemi a patogenními organismy (Holtmeier 2009).

Podstatnou úlohu sehrávají samotné **vlastnosti druhů stromů** tvořících horní hranici lesa, jedná se o jejich ekologické vlastnosti, etapy sukcese, způsob rozmnožování (pohlavní, vegetativní) a způsob rozptýlu semen (anemochorní, zoochorní). Jenom několik taxonomických jednotek po celém světě dosahuje výškového limitu stromů jako životních forem, tj. výška, ve které stromy nemohou růst bez ohledu na druh stromu. Necelých 20 čeledí rostlin je schopno tvořit horní hranici lesa, z toho 100 druhů dřevin je schopno žít na klimatické horní hranici lesa (Körner 2012). Jedny z celosvětově nejrozšířenějších čeledí jsou například Hvězdnicovité (*Asteraceae*), Břízovité (*Betulaceae*), Cypřišovitité (*Cupressaceae*), Vřesovcovité (*Ericaceae*), Myrtovité (*Myrtaceae*), Borovicovité (*Pinaceae*) a Růžovité (*Rosaceae*) (Körner 2007). Pokud je horní hranice lesa formována více než jedním druhem, tak odlišné vlastnosti a požadavky druhu (např. stín tolerantní a netolerantní druhy, pionýrské a klimaxové druhy, druhy závislé na rozptýlení semen zvířaty nebo větrem) hrají důležitou roli ve vývoji stromů a rovněž také pokud jde o strukturu, fyziognomii a klimaticky vyvolaný postup horní hranice lesa (Holtmeier 2009). Kompetičně silné druhy jako buk lesní (*Fagus sylvatica*) nebo smrk ztepilý (*Picea abies*) často tvoří husté porosty a ostrou horní hranici lesa, zatímco méně kompetičně silné druhy jako modřín, borovice nebo jalovec vytváří spíše rozptýlenou horní hranici lesa (Holtmeier 2009).

Ve většině hor Evropy a Asie, které byly osídleny již v pravěku, mělo **využívání krajiny člověkem** za následek snížení výšky horní hranice lesa téměř všude, kromě nepřístupných příkrých svahů (Holtmeier 2009). Rozsah snížení horní hranice lesa však kolísá regionálně. Jako průměrná hodnota je přijímáno snížení 150 - 300 m pod nejvyšší postglaciální úroveň klimatické horní hranice lesa (Holtmeier 2009). Mírné, jižně orientované svahy s dobrou dostupností byly často kompletně odlesněny, zatímco lesy na prudkých svazích byly ovlivněny méně. Odlesnění bylo nejčastěji způsobeno potřebou dřeva pro těžbu a získání ploch pro zemědělství a pastevectví. Kromě polohy, ovlivňuje dopad člověka také distribuci, složení a strukturu současné horní hranice lesa (Holtmeier 2009). V poslední době pozorování v evropských pohořích naznačují, že postup horní hranice lesa je spuštěn hlavně zastavením lidské činnosti (pastevectví, těžba) spíše než vzrůstem teplot (Holtmeier a Broll 2005). Podle Gehrig-Fasel et al. (2007) je opouštění území člověkem ve Švýcarských Alpách dominantním faktorem, jak pro zarůstání bezlesých ploch pod horní hranicí lesa, tak pro většinu postupů horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek. Relativně pomalé uchycování stromů na opuštěných pastvinách může být dáno extrémním mikroklimatem vyplývajícím z odstranění lesa (Holtmeier a Broll 2005)

Kromě člověka ovlivňují horní hranici lesa také **zvířata**. Populace divoce žijících kopytníků mohou lokálně bránit nebo dokonce zabránit ve vývoji mladých stromků v ekotonu horní hranici lesa a alpínské tundře a to okusováním, zbavením stromů kůry nebo pošlapáním. Obecně divocí kopytníci spíše poškozují stromy v horní hranici lesa, než aby měli nějaký pozitivní efekt (Holtmeier 2009).

Samotný postup lesa vzhůru je výsledkem mnoha spolu souvisejících faktorů, z nichž nejdůležitější roli hraje teplota vegetačního období, jejíž zvýšení má za následek postup horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek nebo zeměpisných šířek (Harsch a Bader 2011). Citlivost horní hranice lesa k environmentálním změnám a zejména k růstu teplot, se mění s lokálními a regionálními topografickými podmínkami, proto se liší jak v rozsahu, intenzitě a procesech změn (Holtmeier a Broll 2005).

1.4. Změny polohy horní hranice lesa v pohořích Evropy – regionální přehled

Poloha horní hranice lesa se měnila již v minulosti. V holocénu kolísala ne více jak o 200 m, což bylo mnohem méně, než bylo očekáváno z historických klimatických změn (Körner 1998). Současná poloha horní hranice lesa v mírném pásmu je nižší zhruba o 100 m ve srovnání s postglaciálním maximem (Körner 1998). Od konce “Malé doby ledové“ postupovala horní hranice lesa vzhůru ve vlnách. Vyplňování bezlesých mezer v ekotonu horní hranice lesa novými stromy a uchycování stromů nad distribučním limitem stromů vyvrcholil mezi příznivými 20. a 40. lety 20. století. Po přestávce tento proces znovu pokračoval od 70. let. Nicméně oteplování a postup nebyl vždy synchronní a vyskytoval se v odlišných regionálních a lokálních intenzitách (Holtmeier a Broll 2009).

Horní hranice lesa je vyšší v kontinentálním klimatu než v oceánských regionech. V Evropě stoupá horní hranice lesa ze 100 m blízko západního pobřeží Irska až do výšky 700 m ve Walesu a dále pak do 1400 m v Krkonoších a do 1700 m ve Vysokých Tatrách. (Holtmeier 2009). Poloha je také pozitivně ovlivňována masivností pohoří. Jak se vzduchové masy přemísťují směrem ke svahům hor, tak jsou nuceny stoupat vzhůru, ochlazují se, dochází ke kondenzaci vody, vytváří se oblaky a začínají vypadávat srážky, které se zvyšují na periferiích horských systémů (Körner 2012). Vnitřní části pohoří jsou proto sušší a přijímají více slunečního svitu. V důsledku těchto procesů je poloha horní hranice lesa níže v okrajových částech horského systému než částech centrálních. Například v severním vápencovém čelním pásmu Alp je poloha horní hranice lesa ve výšce 1600 m, dosahující výšky 2000 m (blízko Innsbrucku) mimo čelní pásmo a nacházející se ve výšce 2350 m v centru Švýcarských Alp (Körner 2012). Celkově se nejvyšší poloha horní hranice lesa v Evropě nachází ve výšce 2700 m v Pyrenejích (Sveinbjörnsson 2000).

1.4.1. Ural

Na mírných svazích Polárního Uralu (Rai-Iz massif, Mounts Tchernaya, Malaya Tchernaya) se ekoton horní hranice lesa, který je tvořen modřínem sibiřským (*Larix sibirica*), nachází v průměrné výšce 230 až 260 m (Shiyatov et al 2007). Mezi roky 1910 – 2000 byl zjištěn postup o 26 m pro otevřený les a 35 m pro zapojený les. Větší postup zapojeného lesa lze vysvětlit tím, že společenstva otevřeného lesa se pod příznivými podmínkami snadno přemění do zapojeného lesa díky více hojně dodávce semen z rostoucích stromů v oblasti lesa otevřeného. Značný postup otevřeného lesa byl zaznamenán i na svazích, které jsou vystavené silným zimním západním větrům a v oblasti

kde hlavním limitujícím faktorem jsou letní teploty, což lze považovat za důkaz toho, že větrné a teplotní podmínky se za posledních 90 let staly mnohem více příhodnější pro růst stromů (Shiyatov et al 2007). Celkově je postup přičítán růstu teplot a zvýšení srážek pozorovanými od 20. let 20. století (Shiyatov et al 2007).

Na Severním Uralu (Tylaisko-Konzhakovsko-Serebryanskii Massif) se poloha horní hranice lesa nalézá ve výšce 850 až 900 m (Kapralov et al. 2006). Les je v této oblasti z druhového hlediska velmi různorodý, je složen převážně z tmavých jehličnanů s dominancí smrku sibiřského (*Picea obovata*), jedle sibiřské (*Abies sibirica*) a borovice sibiřské (*Pinus sibirica*), další druhy vyskytující se v ekotonu jsou borovice lesní (*Pinus sylvestris*), bříza pýřitá (*Betula tortuosa*) a modřín sibiřský (*Larix sibirica*). Oblast nebyla vystavena významnému antropogennímu vlivu. Mezi roky 1956 – 2005 postoupila horní hranice lesa na většině svahů v průměru o 41 m. Vyskytly se také značné změny v kompozici, hustotě a výšce stromového patra. Za pozornost stojí expanze břízy, která díky pozitivní reakci na zvyšující se letní a zimní srážky byla nejvíce aktivní ve srovnání s některými jehličnany, jejichž poměr v ekotonu naopak klesal. Všechny tyto změny jsou prisuzovány růstu teplot a zvýšení srážek (Kapralov et al. 2006).

Na Jižním Uralu (Mali Iremel) se ekoton horní hranice lesa tvořený smrkem sibiřským (*Picea obovata*) nachází na mírných svazích ve výšce 1200 až 1400 m. Na základě historických fotografií byl mezi roky 1929 – 1999 zjištěn postup o 60 – 80 m do nedotčené tundry (Kammer et al. 2009).

1.4.2. Severní Fennoskandinávie

Na poloostrově Kola v pohoří Chibiny zjišťovali Mathisen et al. (2014) změnu polohy horní hranice lesa na dvou místech, Tuliok, kde horní hranice lesa tvořená břízou pýřitou (*Betula tortuosa*) dosahuje na severních svazích průměrné výšky 535 m a Yumehorr, kde je horní hranice lesa složená z borovice lesní (*Pinus sylvestris*) lokalizována na jihozápadních svazích s průměrnou výškou 400 m. Pomocí leteckých a satelitních snímků a dendrochronologických záznamů byl mezi roky 1958 – 2008 zjištěn postup břízy v lokalitě Tuliok o 29 m a postup borovice v lokalitě Yumehorr o 27 m. Postup byl doprovázen patrným vyplňováním již stávající stromové populace a uchycováním stromů mimo horní hranici lesa. Očividné zvýšení uchycování nových jedinců se vyskytovalo v pozdních 80. letech 20. století pro břízu a v 70 a 80. letech pro borovici. Zaznamenaná klimatická změna v podobě zdvojnásobení sezónních a ročních

srážek (Førland et al. 2009), se jeví jako hlavní příčina změny ekotonu v regionu (Aune et al. 2011).

Ve finském Laponsku (Lommoltunturi fell) se ekoton horní hranice lesa nachází ve výšce 475 až 505 m. Dominantním druhem je zde smrk ztepilý (*Picea abies*). Ve 40 - 60. letech 19. století byla poloha horní hranice lesa ve výšce 418 m (Sutinen et al. 2012). Během klimatického oteplování ve 20. letech 20. století byl zaznamenán významný posun do výšky 472 m. V polovině 20. století posun stagnoval z důvodů nepříznivých klimatických podmínek, přesto se v polovině 80. let horní hranice lesa posunula za 20 let do výšky 505 m. Přežití nebo uchycení semenáčků v tundře je bráněno větrným zimním klimatem, kryoturbací a soliflukcí půdy a nízkým poměrem Ca:Al v půdě. Také byla zjištěna významně vyšší letní teplota půdy v tundře než v lese, což naznačuje, že teplota není limitujícím faktorem postupu horní hranice lesa do větších nadmořských výšek (Sutinen et al. 2012).

1.4.3. Skandinávské pohoří

V oblasti Torneträsk situované na východním okraji Skandinávského pohoří v subarktickém Švédsku se horní hranice lesa nalézá ve výšce okolo 700 m (Dalen a Hofgard 2005). Ekoton je tvořen břízou pýřitou (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*) V období mezi roky 1913 - 2006 se teplota v regionu zvýšila o 2,5°C (Callaghan et al. 2010 in Van Bogaert 2011). Mezi roky 1912 – 2009 na čtyřech z osmi zkoumaných míst v průměru postoupila horní hranice lesa o 24 m a tři testovaná místa zaujímala stálou pozici. Maximální postup byl 145 m a maximální ústup byl 120 m. Největší postup byl zaznamenán během chladnějších pozdních 60. a 70. letech 20. století. Tento postup horní hranice lesa je spojován v té době s nízkým stavem populace sobů (*Rangifer tarandus*). Snižující se antropogenní dopad začátkem 20. století byl zjištěn jako hlavní faktor tvarující současnou horní hranici lesa a její dynamiku. Kromě toho epizodické disturbance způsobené hmyzem a geomorfologické procesy mají za následek snížení a dlouhodobou stabilitu pozice horní hranice lesa (Van Bogaert et al. 2011).

V jižních švédských Skandách se horní hranice lesa nachází ve výšce okolo 900 m. Ekoton je složen z břízy pýřité (*Betula pubescens* ssp. *czerepanovii*), smrku ztepilého (*Picea abies*) a borovice lesní (*Pinus sylvestris*) (Kullman a Öberg 2009). Mezi roky 1915 – 2007 byl u 95 % studovaných lokalit zaznamenán postup v průměru mezi 70 – 90 m. Postup vzhůru za posledních 100 let je v souladu se zvyšujícími se trendy letních a zimních

teplot. Maximální vzestup všech druhů o 200 m je souhlasný s oteplením o 1,4°C. Takovýto rozsah postupu může být realizován pouze za příhodných topografických podmínek, především na místech chráněných před větrem a na strmých konkávních svazích. Na místech, která jsou více vystavena větru, je menší rozsah vzestupu. Proto jsou reakce horní hranice lesa ke klimatickým změnám značně heterogenní a závislé na místních podmínkách (Kullman a Öberg 2009).

Hofgaard et al. (2009) prováděli výzkum horní hranice lesa napříč celým Skandinávským pohořím v lokalitách Joatka (69°45'S, 23°55'V), Abisko (68°20'S, 18°50'V) a Dovre (62°15'S, 9°35'V). V lokalitě Joatka na severu Norska se horní hranice lesa nachází ve výšce 438 – 570 m. V lokalitě Abisko severu Švédska se nachází horní hranice lesa v nadmořské výšce 752 – 1000 m. V lokalitě Dovre na jihu Norska se horní hranice lesa nalézá ve výšce 1150 – 1448 m. Ve všech třech lokalitách bylo zaznamenáno zvýšení teplot během zimy od 80. let 20. století. Na základě dendrochronologických metod byla zjištěna expanze břízy pýřité (*Betula tortuosa*) ve všech lokalitách a to nejvíce na svazích s jižní orientací. Na těchto svazích je díky větším dodávkám tepla méně sněhu, což má za následek delší vegetační období, jehož délka kladně ovlivňuje přežití mladých stromků (Hofgaard et al. 2009). Podle Dalen a Hofgaard (2005) je sníh hlavním faktorem kontrolující expanzi horní hranice lesa v severních oblastech, zatímco v jižních částech Skand jsou hlavními faktory teplota a okus zvěří.

1.4.4. Krkonoše a Hrubý Jeseník

Ekotony horní hranice lesa v těchto pohořích se nacházejí v horních nebo centrálních částech svahů vy výšce od 1200 do 1400 m. Poloha je často limitována kamennými moři a lavinovými dráhami (Tremel a Chuman 2014). V posledních 80 letech byla zkoumaná oblast vystavena zvýšení teploty o 1°C a také zmírnění přímého dopadu člověka. Mezi roky 1940 - 1950 docházelo k opouštění zemědělské půdy v horských oblastech a přibližně od roku 1950 se nevyskytují téměř žádné přímé zásahy člověka s výjimkou lokálního zalesňování. Ekoton horní hranici lesa je tvořen smrkem ztepilým (*Picea abies*) a borovicí kleč (*Pinus mugo*). Na základě ortorektifikovaných leteckých snímků byl v Krkonoších zjištěn postup horního limitu zapojeného lesa mezi lety 1936 – 2005 v celkovém tempu 0,43 m za rok a v Hrubém Jeseníku byl mezi lety 1953 – 2005 zaznamenán postup 0,30 m za rok. Bylo odhaleno, že vyplňování bezlesí pod horní hranicí lesa stromy je podstatně větší než postup samotných stromů nad počáteční pozici horní

hranici lesa. Postupy lesa vzhůru byly více pravděpodobné na místech s již uchycenými, spíše rozptýlenými stromy a na místech s nízkým pokryvem kleče. Výskyt kompetičně silné borovice kleče a přítomnost klimaticky extrémních konvexních částí svahů nad nedávnou pozicí horní hranice lesa pravděpodobně omezuje postup ekotonu ve srovnání s jinými evropskými pohořími. Jako hlavní příčina postupu horní hranice lesa je pravděpodobně kombinace faktorů opouštění půdy člověkem a vzestup teploty (Tremel a Chuman 2014).

1.4.5. Karpaty

Weisberg et al. (2013) zkoumali dynamiku horní hranice lesa napříč celými Karpaty. Ekoton horní hranice lesa je v tomto pohoří tvořen smrkem ztepilým (*Picea abies*), bukem lesním (*Fagus sylvatica*), borovicí limbou (*Pinus cembra*) a borovicí kleč (*Pinus mugo*). Změny v poloze horní hranice lesa byly zkoumány pro období 1880 – 1930 a 1930 – 2000. Největší vzestup v období 1880 – 1930 byl zjištěn v severních rumunských Karpatech, naopak nejvíce se horní hranice lesa snížila v jižních rumunských Karpatech. V období 1930 – 2000 byl zjištěn postup vzhůru v průměru o 56,9 m. V tomto období byl zaznamenán největší vzestup opět v severních rumunských Karpatech, zatímco nejvíce horní hranice poklesla v Západních Karpatech. Nejstálejší je horní hranice lesa v Ukrajinských Karpatech a to jak v období 1880 – 1930 tak 1930 – 2000. Celkově byl vzestup horní hranice lesa častější v období 1930 – 2000 než 1880 – 1930. Vzestup horní hranice lesa je ovlivňován hlavně změnou využití půdy. V oblastech, kde se již vyskytuje opětovné zalesnění, hrají důležitou roli biofyzikální faktory jako strmost svahů, výška horní hranice lesa, křovinný pokryv, tvar reliéfu, orientace svahu a blízkost cest. Vzrůst teploty od 70. let 20. století urychluje postup horní hranice lesa pouze tam, kde je lidská činnost redukována nebo se už vůbec nevyskytuje (Weisberg et al. 2013).

V Ukrajinských Karpatech se horní hranice lesa tvořená smrkem ztepilým (*Picea abies*) a bukem lesním (*Fagus sylvatica*) nachází v průměrné výšce 1300 m (Martazinova et al. 2011). Mezi roky 1930 – 2000 se horní hranice lesa posunula v průměru o 13 m. Velikost posunu však vykazuje značnou prostorovou variabilitu. Například v oblasti Horhan byl posun o 46 m, zatímco v Poloninách byl zaznamenán ústup o 14 m. Postup do větších nadmořských výšek byl zjevný u ekotonů tvořených jehličnany, naopak na místech s listnatým lesem byl postup malý nebo žádný. Vliv lidské přítomnosti v této oblasti je reprezentován zejména pastevectvím, které v posledních letech upadá, ale přesto

v některých lokalitách brání postupu horní hranice lesa. Celkově je postup připisován především zvýšení teploty (Martazinova et al. 2011).

Sitko a Troll (2008) prováděli výzkum horní hranice lesa v Čornohoře, v nejvyšším pohoří Ukrajinských Karpat. Průměrná výška horní hranice lesa v této oblasti je 1376 m a je tvořena smrkem ztepilým (*Picea abies*), borovicí limbou (*Pinus cembra*), bukem lesním (*Fagus sylvatica*) a v menší míře javorem klenem (*Acer pseudoplatanus*). Oblast je značně využívána člověkem. Jedná se o jedno z nejdůležitějších center letního farmaření ve Východních Karpatech (Posysen' 1994; Tyvodar 1994 in Sitko a Troll 2008). Mezi roky 1933 – 2001 byl zjištěn postup horní hranice lesa v průměru o 47 m a rozloha pastvin se snížila o jednu třetinu. Nejmenší změny v poloze se vyskytovaly v oblastech, kde byla hranice lesa tvořena listnatými stromy, naopak největší změny v poloze nastaly u hranice lesa tvořené jehličnany. Nejdůležitějším faktorem ovlivňující horní hranici lesa je chov zvířat ve formě letní pastvy na horských pastvinách. Změny horní hranice lesa jsou mnohem menší v blízkosti farem, které zůstávají stále nad horní hranicí lesa. Široce uznávaný faktor podporující postup horní hranice lesa jakým je růst teploty, je považováno pouze za doplňkový (Sitko a Troll 2008).

V Kalimanských horách nacházející se v rumunských Karpatech se horní hranice lesa nalézá výšce okolo 1700 m (Kern a Popa 2008). Ekoton tvoří smrk ztepilý (*Picea abies*) a borovice limba (*Pinus cembra*). Mezi roky 1910 – 2006 byl zjištěn postup horní hranice lesa o 65 m. Jako jeden z možných důvodů postupu je snižování mrazového stresu v ekotonu horní hranice lesa (Kern a Popa 2008).

1.4.6. Alpy

V údolí Ötztal v rakouských Centrálních Alpách se horní hranice lesa tvořená smrkem ztepilým (*Picea abies*) a modřínem opadavým (*Larix decidua*) nachází ve výšce okolo 1900 m (Wallentin et al. 2008). Mezi roky 1954 – 2006 byl zaznamenán postup o 88 m. Rozhodujícím faktorem ovlivňující expanzi horní hranice lesa do bezlesí je rostoucí plodivost stromů. Významný vliv má také změna využití půdy (Wallentin et al. 2008).

Leonelli et al. (2011) zkoumali horní hranici lesa v regionu Valle d'Aosta v západních Italských Alpách. Horní hranice lesa, která je tvořena modřínem opadavým (*Larix decidua*) a v menší míře borovicí limbou (*Pinus cembra*), se nachází ve výšce 2500 m. V období mezi roky 1901 – 2008 byl zjištěn postup o 125 m. Poloha horní hranice lesa je ovlivňována hlavně dopadem člověka a geomorfologickými faktory. Ve dvou ze tří

zkoumaných míst určuje polohu ze 70 % vliv člověka, zbylých 30 % je přisuzováno geomorfologickým faktorům. Nedávné posuny a akcelerace kolonizace stromů v alpínském stupni je připisována hlavně dramatickému zvýšení teploty (Leonelli et al. 2011).

V oblasti povodí řeky Val Masino v italských Centrálních Alpách se horní hranice lesa nachází ve výšce 1950 m (Diaz-Varela et al. 2010). Ekoton je tvořen borovicí lesní (*Pinus sylvestris*), smrkem ztepilým (*Picea abies*), borovicí kleč (*Pinus mugo*) a modřínem opadavým (*Larix decidua*). Mezi roky 1957 – 2003 byl zaznamenán postup horní hranice lesa o 109 m. Zvyšující se teplota je pravděpodobně nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím postup horní hranice lesa (Diaz-Varela et al. 2010).

Motta a Nola (2001) prováděli výzkum horní hranice lesa v údolí Varaita v Kottických Alpách v Itálii. Horní hranice lesa tvořená borovicí limbou (*Pinus cembra*) a modřínem opadavým (*Larix decidua*) se nachází ve výšce 2350 – 2650 m a patří mezi nejvýše položené v Alpách. Bylo zjištěno, že současný subalpínský les byl založen před 200 – 220 lety nejspíše po odlesnění. Antropogenní vliv je pravděpodobně hlavním faktorem ovlivňující současnou pozici horní hranice lesa, která stále expanduje. Přesto je obtížné určit jasnou příčinu vedoucí k postupu horní hranice lesa, jelikož současně snižující se pastva a růst teplot koncem 19. století komplikují interpretaci změn, zejména díky chybějícím detailním záznamům o pastevectví a klimatu (Motta a Nola 2001).

Vittoz et al. (2008) zkoumali horní hranici lesa v lokalitách Grächen a Ginals v Centrálních Švýcarských Alpách. Horní hranice lesa se nachází v těchto lokalitách ve výšce v rozmezí 2100 až 2580 m a je složena z borovice limby (*Pinus cembra*) a modřínu opadavého (*Larix decidua*). Během 20. století se průměrná roční teplota v této oblasti zvýšila o 0,95°C. Pomocí dendrochronologických metod byl zjištěn rychlý posun nenarušené horní hranice lesa okolo roku 1850 v lokalitě Grächen, zatímco v lokalitě Ginals byl pozorován vzestup antropogenní horní hranice lesa až se zpožděním 60 let a to v důsledku snížení chovu dobytka. Expanze horní hranice lesa je přičítána klimatickým změnám a změnám využití půdy (Vittoz et al. 2008).

Gehrig-Fasel et al. (2007) prováděli výzkum horní hranice lesa ve Švýcarských Alpách. V severní části švýcarských Alp je ekoton tvořen smrkem ztepilým (*Picea abies*) a v jižní části společně s modřínem opadavým (*Larix decidua*) a borovicí limbou (*Pinus cembra*). Mezi roky 1985 – 1997 byl zjištěn průměrný posun horní hranice lesa o 38 m. Jenom 4% postupů dosáhlo nad potenciální regionální horní hranici lesa, zatímco zbylých

96% všech postupů bylo lokalizováno pod touto hranicí. Většina postupů byla nejaktivnější v pásu 300 m pod potencionální regionální horní hranicí lesa, což nasvědčuje tomu, že změna využití půdy je pravděpodobně nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím polohu horní hranice lesa. Opouštění území je nejdominantnějším faktorem jak pro zalesňování bezlesích oblastí pod horní hranicí lesa, tak pro většinu postupů blízko horní hranice lesa. Jen malý zlomek postupů může být přisuzován vzestupu teplot (Gehrig-Fasel et al. 2007).

1.4.7. Apeniny

Piermattei et al. (2012) zkoumali horní hranici lesa v lokalitách Acuto a Vettore v regionu Marche v centrálních Apeninách. V lokalitě Acuto se horní hranice lesa nachází ve výšce mezi 1350 – 1450 m a v lokalitě Vettore ve výšce okolo 1600 m. Dominantními dřevinami v těchto oblastech jsou buk lesní (*Fagus sylvatica*) a borovice černá (*Pinus nigra*). V obou lokalitách byla zjištěna expanze borovice černé, která započala zhruba před 30 lety. Expanze je připisována snižující se pastvě hospodářských zvířat v posledních dekádách a růstu teploty v posledních 40 letech, jejíž zvýšení poskytuje vhodnější podmínky ve větší nadmořské výšce pro klíčení, přežití, růst a reprodukci nových jedinců borovice černé (Piermattei et al. 2012).

1.4.8. Pyreneje

Camarero a Gutiérrez (2004) prováděli výzkum horní hranice lesa v lokalitách Ordesa, Tessó a Estanys de la Pera ve španělských Pyrenejích. Horní hranice lesa tvořená borovicí pyrenejskou (*Pinus uncinata*) se nachází ve výšce od 2100 m (Ordesa) do 2400 m (Estanys de la Pera). Studované oblasti Ordesa a Tessó nebyly v posledních 50 letech ovlivněny člověkem, Estanys de la Pera byla pouze lehce narušena pastevectvím. Na základě dendrochronologických metod byl zjištěn významný posun v druhé polovině 19. století, dosahující maximální výšky horní hranice lesa začátkem 20. století, v druhé polovině 20. století zůstává poloha neměnná. Od 50. let 20. století se horní hranice lesa vyznačuje zvyšováním velikosti a hustoty stromů v ekotonu a minimálním nebo nulovým postupem. Byl zjištěn negativní vztah mezi postupem a březnovými teplotami. Teplejší březnové teploty mohou urychlit tání sněhové pokrývky a tím snížit její tloušťku, což má za následek vystavení vzrostlých stromů negativnímu vlivu větrné abraze a následné zvýšení mortality stromů v okrajových částí ekotonu (Tranquillini 1979, Frey 1983 in

Camarero a Gutiérrez 2004). Dřívější tání sněhu může také vést k vysušování půdy v letním období a tím ovlivnit přežití semenáčků (Camarero a Gutiérrez 2004).

V pohoří Montseny ležící v Katalánsku se horní hranice lesa nachází ve výšce mezi 1600 – 1700 m (Peñuelas a Boada 2003). Dominantní dřevinou v této oblasti je buk lesní (*Fagus sylvatica*). Díky vyhlášení přírodního parku v roce 1977 se snížil dopad člověka na toto území. V posledních 50 letech se průměrná roční teplota v tomto regionu zvýšila od 1,2 – 1,4°C. V období mezi roky 1945 – 2001 byl zaznamenán postup o 70 m. Hlavními faktory ovlivňujícími postup horní hranice lesa jsou zvyšující se teplota a snížení antropogenního vlivu ve formě pastevectví a lesnictví (Peñuelas a Boada 2003).

2. Metodika

Databáze byla vytvořena na základě údajů získaných z rešerše článků, které se zabývají problematikou dynamiky horní hranice lesa. Jako zájmová oblast byla pro tvorbu databáze zvolena evropská pohoří (obrázek 3). Hledání článků pro databázi bylo prováděno pomocí Google Scholar a především přes reference v jednotlivých člancích. Hlavními atributy databáze, které byly získány z vědeckých článků, jsou poloha, velikost vzestupu, teplotní trend, druh dřeviny, metoda výzkumu a trend v land-use. Tyto atributy byly vybrány záměrně, jelikož hrají významnou roli v dynamice horní hranice lesa. Do databáze byly zařazeny jen takové články, které kvantitativně udávají velikost změny polohy hranice lesa za definované období, a které jsou vztaženy ke konkrétnímu regionu.

Velikost vzestupu je počítána jako podíl mezi vzestupem horní hranice lesa (m) a délkou doby zkoumání (rok) a je tedy udáván v metrech za rok. Další atributy jako typ dřeviny (jehličnaté, listnaté), metoda výzkumu (dendrochronologická, DPZ) a vliv člověka (je, není) nabývají dvou rozdílných hodnot. Druh dřeviny, která tvoří horní hranici lesa, zastupují jehličnany a listnáče. Metoda výzkumu, kterou je zkoumána dynamika horní hranice lesa, je zastoupena dendrochronologickou metodou a metodou srovnávání leteckých snímků. Proměnná vlivu člověka popisuje, zda zkoumaná lokace byla anebo nebyla vystavena antropogennímu vlivu.

Pro každou lokalitu se studovanou dynamikou horní hranice lesa byly počítány teplotní trendy na základě databáze CRU TS 3.10 (Mitchell, Jones 2005, aktualizováno) dostupných z webových stránek Královského nizozemského meteorologického ústavu. Databáze CRU TS 3.10 obsahuje průměrné měsíční teploty za období 1901 – 2009, které jsou interpolovány na síti zeměpisných souřadnic s rozlišením $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (Mitchell, Jones 2005, aktualizováno). Teplotní trendy byly počítány pomocí lineární regrese v programu Microsoft Excel, kdy směrnice proložené regresní přímkou vyjadřuje samotný teplotní trend. Celkem bylo vypočítáno 10 skupin teplotních trendů. Jedná se o jarní, letní, podzimní, zimní a roční trendy a to jak pro období, ve kterých byl zkoumán vzestup horní hranice lesa v jednotlivých studiích, tak pro celá období mezi roky 1901 – 2009 (tabulka 2).

Statistické vyhodnocení databáze bylo provedeno v programu IBM SPSS Statistics verze 20. Při analýze databáze byla použita jako hlavní statistická metoda Pearsonův a Spearmanův korelační koeficient a to v závislosti na rozložení dat. Test normality dat byl počítán pomocí Shapiro-Wilkova testu (Wonnacott a Wonnacott 1993). Další metodou

použitou při vyhodnocení databáze byla shluková analýza, která byla počítána Wardovou shlukovou metodou na základě euklidovské podobnosti (Wonnacott a Wonnacott 1993). Díky této shlukové analýze byly záznamy v databázi rozděleny na dvě skupiny z hlediska podobnosti teplotních trendů. Na lokalitách s relativně podobnými teplotními trendy (tj. rozčleněných do dvou skupin pomocí shlukování) bylo dále provedeno testování vlivu metody výzkumu a antropogenních zásahů na velikost vzestupu horní hranice lesa. Jelikož data nejsou normálně rozdělena, tak byl v tomto případě použit Mann-Whitneyův test, který je vhodný právě pro testování dat, jež nejsou normálně rozdělena (Wonnacott a Wonnacott 1993). Statistická významnost korelačních koeficientů a testů byla hodnocena na 5 % hladině významnosti.

3. Výsledky

Celkem databáze obsahuje 23 záznamů, které zastupují většinu významných evropských pohoří (obrázek 3). Na základě samotných záznamů, lze z databáze vyvodit několik skutečností týkajících se vlastností horních hranic lesa v Evropě (tabulka 1). Vzestup horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek byl zaznamenán u naprosté většiny případů. Největší vzestup byl pozorován v rakouských Alpách, kde je tempo vzestupu horní hranice lesa 1,6 m za rok, naopak v Ukrajinských Karpatech byl zaznamenán ústup v tempu -0,2 m za rok (tabulka 1). Výšková poloha horní hranice lesa značně kolísá napříč celou Evropou, o čem svědčí i jednotlivé záznamy v databázi. Nejnižší položená horní hranice lesa se nalézá na Polárním Uralu ve výšce 245 m a nejvýše položená horní hranice lesa se nachází v italských Alpách ve výšce 2500 m (tabulka 1). Z druhového hlediska tvoří většinu horní hranice lesa v Evropě jehličnaté stromy, pouze ve Skandinávii a v Laponsku je ekoton tvořen břízou a v Karpatech, kde je na některých místech ekoton tvořen bukem (tabulka 1). Teplotní trendy mají u většiny lokalit vzrůstající charakter, výjimkou jsou pouze Karpaty, kde se teplotní trendy za období, v kterých byly lokality zkoumány (tj. přibližně od 30. let 20. století do roku 2000) dostávají do záporných hodnot. Celkově se nejvíce vzrůstající roční teplotní trendy vyskytují v Pyreneích za období 1901 – 2009 a od poloviny 20. století také v polárních oblastech (tabulka 2). Určitá forma antropogenního vlivu byla zjištěna u 15 z 23 lokalit, u zbylých 8 lokalit nebyl zaznamenán žádný dopad člověka, jedná se hlavně o Ural a polární oblasti (tabulka 1). Z pohledu použitých metod při výzkumu vzestupu horní hranice lesa, je nejvíce používanou metodou analýza leteckých snímků a map, na rozdíl od dendrochronologických metod, které jsou použity zhruba u čtvrtiny studií vyskytujících se v databázi (tabulka 1).

Pomocí korelačních koeficientů byly zjišťovány závislosti mezi vzestupem a jednotlivými teplotními trendy. Takovéto korelace byly prováděny také na jednotlivých podsouborech, aby bylo možné zjistit, zda je nějaká souvislost mezi vzestupem a antropogenním vlivem či metodou výzkumu. Výsledky korelačních koeficientů počítaných na 5% hladině významnosti jsou uvedeny v tabulce 3. Nejsilnější kladná korelace, u které byla prokázána signifikantní závislost, je mezi vzestupem horní hranice lesa bez antropogenního vlivu a zimním teplotním trendem za období 1901 – 2009, dále jsou ještě poměrně silné závislosti mezi vzestupem horní hranice lesa zkoumané pomocí metody leteckých snímků a ročním teplotním trendem za období 1901 – 2009. Nejsilnější záporná

korelace, u které byla prokázána signifikantní závislost, je mezi vzestupem horní hranice lesa zkoumané pomocí dendrochronologické metody a oběma letními teplotními trendy (tabulka 3).

U skupin rozdělených na základě podobnosti teplotních trendů byly testovány vzestupy s vybranými atributy (metoda výzkumu, antropogenní vliv). Skupina 1 se vyznačuje nízkou rostoucími, v některých případech až zápornými teplotními trendy a to jak za období 1901 – 2009, tak za období, v kterých byla horní hranice lesa zkoumána, naopak skupina 2 je charakterizována vyššími teplotními trendy za obě období než skupina 1. Kvůli nízkému počtu vzorků bylo možné otestovat vliv jen u některých atributů. Skupinu 1 bylo možno otestovat pouze s antropogenním vlivem (je, není) a z výsledku p-hodnoty 0,106 vyplývá, že přítomnost či nepřítomnost antropogenního ovlivnění nemá statisticky významný vliv na vzestup horní hranice lesa. Skupinu 2 bylo možno otestovat pouze s metodami výzkumu a z výsledku p-hodnoty 0,042 vyplývá, že metoda výzkumu má v případě této skupiny statisticky významný vliv na velikost vzestupu horní hranice lesa.

Tabulka 1: Vlastnosti horní hranice lesa v Evropě

Místo	Poloha	Výška HHL (m n. m.)	Velikost vzestupu	Období vzestupu	Metoda výzkumu	Druh dřeviny	Vliv člověka
Polární Ural (Shiyatov et al. 2007)	66°51'S, 65°36'V	245	0,38	1910 - 2000	snímky	jehličnaté (<i>Larix sibirica</i>)	není
Severní Ural (Kapralov et al. 2006)	59°35'S, 59°10'V	875	0,82	1956 - 2005	snímky	jehličnaté (<i>Picea obovata</i> , <i>Larix sibirica</i> , <i>Pinus sibirica</i> , <i>Abies sibirica</i> , <i>Betula tortura</i>)	není
Jižní Ural (Kammer et al. 2009)	54°32'S, 58°51'V	1260	1,14	1929 - 1999	snímky	jehličnaté (<i>Picea obovata</i>)	není
Severní Skandy - Abisko (Van Bogaert et al. 2011)	68°25'S, 19°00'V	700	0,2	1912 - 2009	snímky	listnaté (<i>Betula pubescens</i>)	je
Švédské Skandy (Kullman a Öberg 2009)	62°15'S, 12°37'V	900	0,98	1915 - 2007	dendro	jehličnaté (<i>Betula pubescens</i> , <i>Picea Abies</i> , <i>Pinus Sylvestris</i>)	je
Severní Fennoskandinávie- Lommoltunturi (Sutinen et al. 2012)	67°59'S, 24°09'V	475	0,62	1947 - 2003	dendro	jehličnaté (<i>Picea abies</i>)	není
Chibiny - Tuliok (Mathisen et al. 2014)	67°42'S, 33°46'V	535	0,6	1958 - 2006	snímky	listnaté (<i>Betula pubescens</i>)	není
Chibiny - Yumechorr (Mathisen et al. 2014)	67°42'S, 33°14'V	400	0,5	1958 - 2008	snímky	jehličnaté (<i>Pinus Sylvestris</i>)	není
Krkonoše (Tremel a Chuman 2014)	50°43'S, 15°40'V	1320	0,43	1936 - 2005	snímky	jehličnaté (<i>Picea abies</i>)	je
Hrubý Jeseník (Tremel a Chuman 2014)	50°01'S, 17°36'V	1330	0,3	1953 - 2005	snímky	jehličnaté (<i>Picea abies</i>)	je
Ukrajinské Karpaty - Beskid (Martazinova et al. 2011)	49°00'S, 23°15'V	1105	0,12	1930 - 2000	snímky	jehličnaté (<i>Picea abies</i>)	je
Ukrajinské Karpaty - Gorgan (Martazinova et al. 2011)	48°30'S, 24°00'V	1393	0,64	1930 - 2000	snímky	jehličnaté (<i>Picea abies</i>)	je
Ukrajinské Karpaty - Poloniny (Martazinova et al. 2011)	48°30'S, 23°20'V	1169	-0,2	1930 - 2000	snímky	jehličnaté (<i>Picea abies</i> , <i>Fagus sylvatica</i>)	je

Místo	Poloha	Výška HHL (m n. m.)	Velikost vzestupu	Období vzestupu	Metoda výzkumu	Druh dřeviny	Vliv člověka
Ukrajinské Karpaty - Marmarosh (Martazinova et al. 2011)	48°00'S, 24°30'V	1448	0,49	1930 - 2000	snímky	jehličnaté (<i>Picea abies</i>)	je
Ukrajinské Karpaty – Chornogora (Sitko a Troll 2008)	48°10'S, 24°23'V	1670	0,59	1933 - 2001	snímky	jehličnaté (<i>Picea abies</i> , <i>Pinus cembra</i>)	je
Rumunské Karpaty - Kalimanské hory (Kern a Popa 2008)	47°06'S, 25°12'V	1800	0,67	1910 - 2006	dendro	jehličnaté (<i>Picea abies</i> , <i>Pinus cembra</i>)	není
Rakouské Centrální Alpy - Ötztal (Wallentin et al. 2008)	47°04'S, 10°58'V	1900	1,6	1954 - 2006	snímky	jehličnaté (<i>Picea abies</i>)	je
Italské alpy - Val Masino (Leonelli et al. 2011)	45°47'S, 7°21'V	2500	1,15	1901 - 2008	snímky	jehličnaté (<i>Larix decidua</i> , <i>Pinus cembra</i>)	je
Italské alpy) - Valle d'Aosta (Díaz-Varela et al. 2010)	46°13'S, 9°58'V	1950	1,3	1957 - 2003	snímky	jehličnaté (<i>Pinus sylvestris</i> , <i>Picea abies</i> , <i>Larix decidua</i>)	je
Katalánsko - Masiv Montseny (Peñuelas a M. Boada 2003)	41°47'S, 2°25'V	1650	1,27	1945 - 2001	snímky	listnaté (<i>Fagus sylvatica</i>)	je
Pyreneje - Ordesa (Camarero a Gutiérrez 2004)	42°37'S, 0°02'Z	2105	0,1	1900 - 1995	dendro	jehličnaté (<i>Pinus uncinata</i>)	je
Pyreneje - Tessó (Camarero a Gutiérrez 2004)	42°36'S, 1°03'V	2345	0,43	1900 - 1995	dendro	jehličnaté (<i>Pinus uncinata</i>)	není
Pyreneje - Estanys de la Pera (Camarero a Gutiérrez 2004)	42°28'S, 1°38'V	2395	0,52	1900 - 1995	dendro	jehličnaté (<i>Pinus uncinata</i>)	je

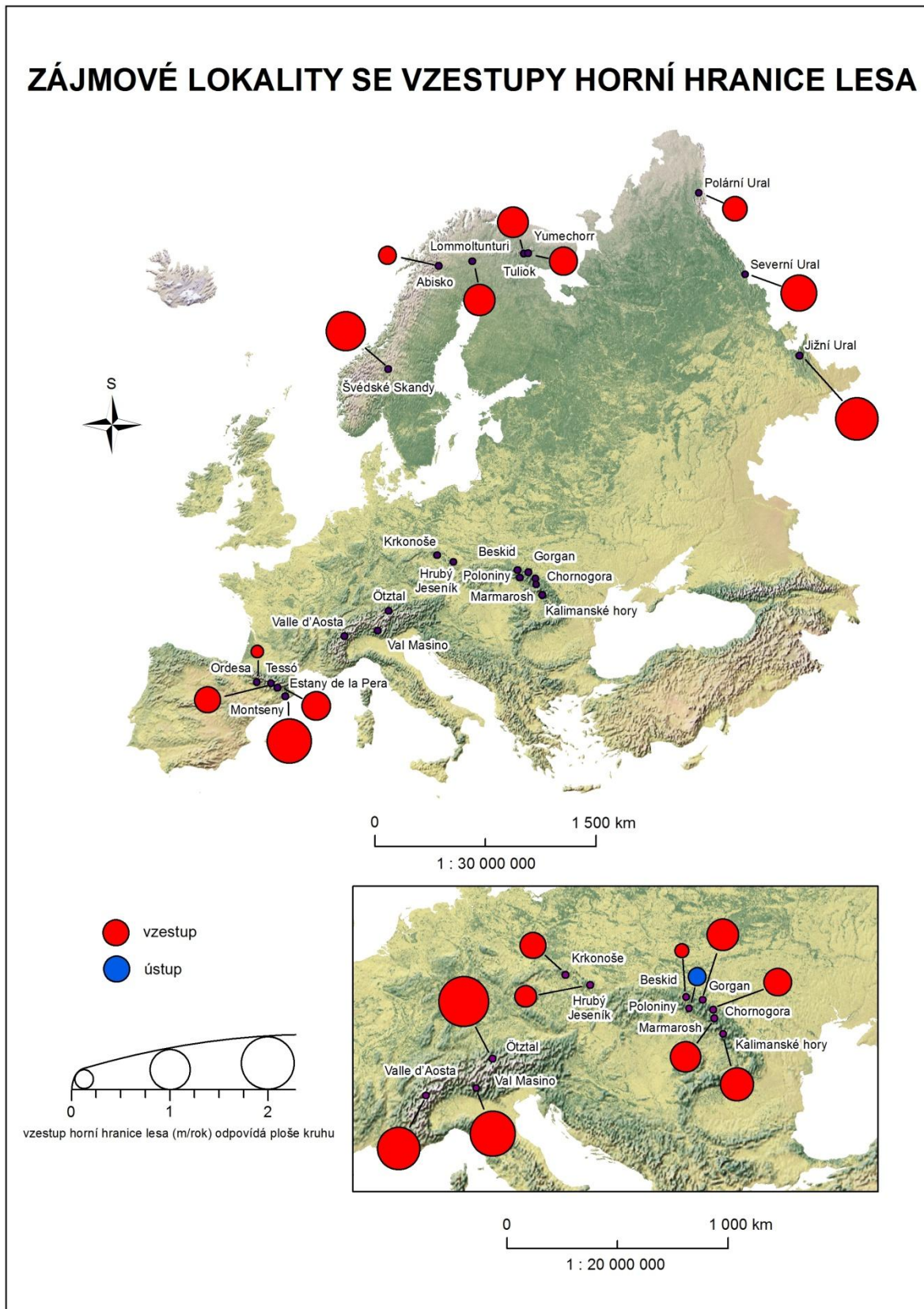
Tabulka 2: Teplotní trendy zájmových lokalit

Lokalita	Teplotními trendy počítané pro období 1901 - 2009					Teplotními trendy počítané pro zkoumané období v závislosti na každé studii				
	Rok	Jaro	Léto	Podzim	Zima	Rok	Jaro	Léto	Podzim	Zima
Polární Ural	0,0054	0,0189	0,0058	-0,0007	-0,0027	0,0015	0,0298	0,0015	-0,0123	-0,0138
Severní Ural	0,0109	0,016	0,0017	0,0102	0,0166	0,0287	0,0386	0,0111	0,0302	0,0375
Jižní Ural	0,0176	0,0248	0,0071	0,0137	0,0248	0,0172	0,0225	0,0026	-0,0005	0,0415
Abisko	0,0091	0,0153	0,011	0,0088	0,0029	0,0095	0,0149	0,0041	0,0087	0,0097
Švédské Skandy	0,0097	0,0107	0,0068	0,0157	0,0088	0,0108	0,0113	0,0076	0,0164	0,0119
Lommoltunturi	0,0071	0,0164	0,008	0,0057	-0,0018	0,0125	0,029	0,0145	-0,0093	0,0158
Tuliok	0,0082	0,0138	0,0075	0,0071	0,0046	0,022	0,0306	0,0087	0,0092	0,0397
Yumechorr	0,0078	0,0138	0,0075	0,0064	0,0038	0,0281	0,0331	0,0038	0,014	0,0505
Krkonoše	0,0105	0,0104	0,0118	0,0108	0,0086	0,0133	0,0148	0,0096	0,0042	0,0241
Hrubý Jeseník	0,0064	0,0063	0,005	0,0067	0,0078	0,0256	0,0388	0,0263	-0,0018	0,039
Beskid	0,0032	0,0037	-0,0008	0,0011	0,0048	-0,0054	0,001	-0,019	-0,0152	0,0128
Gorgan	0,0027	0,0019	0,0002	0,0019	0,0062	-0,0055	-0,0031	-0,018	-0,0148	0,0133
Poloniny	0,0022	0,002	-0,0005	0,0014	0,006	-0,0059	-0,0034	-0,017	-0,014	0,0133
Marmarosh	0,0038	0,0012	0,0023	0,0035	0,0061	-0,0037	-0,0035	-0,014	-0,0123	0,0122
Chornogora	0,0046	0,0024	0,0021	0,0053	0,0069	-0,0005	0,00006	-0,011	-0,0089	0,0163
Kalimanské hory	0,0071	0,0032	0,0063	0,0056	0,0094	0,0029	-0,0013	0,0044	0,0027	0,0056
Ötztal	0,0117	0,0088	0,0142	0,009	0,0137	0,0201	0,0186	0,0321	0,0067	0,0213
Val Masino	0,0135	0,0107	0,0147	0,0132	0,014	0,0132	0,0098	0,0147	0,0128	0,0145
Valle d'Aosta	0,0118	0,0122	0,0124	0,0101	0,0124	0,0289	0,0329	0,0441	0,0091	0,0294
Montseny	0,014	0,0108	0,0186	0,0158	0,0107	0,008	0,0029	0,005	0,0044	0,0196
Ordesa	0,019	0,0159	0,0218	0,0213	0,017	0,0152	0,0097	0,0159	0,02	0,0152
tessó	0,0164	0,0139	0,0204	0,0179	0,0134	0,0128	0,0079	0,0151	0,0165	0,0118
Estanys de la Pera	0,0149	0,0118	0,0192	0,0166	0,0119	0,0119	0,0066	0,0147	0,0156	0,0108

Tabulka 3: Hodnoty korelačních koeficientů mezi vzestupem horní hranice lesa a jednotlivými teplotními trendy počítaných na 5% hladině významnosti; korelační koeficienty, u kterých byla prokázána signifikantní závislost jsou vyznačeny tučně

Korelace vzestupu s teplotními trendy počítané pro období 1901 - 2009					
Lokalita	Teplotní trend				
	Rok	Jaro	Léto	Podzim	Zima
Všechny lokality	0,396	0,216	0,273	0,307	0,445
Podskupina - Metoda: snímky	0,755	0,331	0,663	0,687	0,66
Podskupina - Metoda: dendrochronologie	-0,771	-0,467	-0,822	-0,489	-0,54
Podskupina - Antropogenní vliv	0,381	0,23	0,389	0,308	0,488
Podskupina - Bez antropogenního vlivu	0,535	0,399	-0,39	0,377	0,777
Korelace vzestupu s teplotními trendy počítané pro zkoumané období v závislosti na každé studii					
Lokalita	Teplotní trend				
	Rok	Jaro	Léto	Podzim	Zima
Všechny lokality	0,403	0,2	0,506	0,289	0,234
Podskupina - Metoda: snímky	0,464	0,197	0,615	0,458	0,238
Podskupina - Metoda: dendrochronologie	-0,502	0,069	-0,943	-0,3	-0,362
Podskupina - Antropogenní vliv	0,462	0,274	0,554	0,364	0,222
Podskupina - Bez antropogenního vlivu	0,288	0,059	-0,175	0,108	0,5

Obrázek 3: Mapa zájmových lokalit se vzestupy horní hranice lesa



4. Diskuze

Na zkoumaném vzorku lokalit byly zjištěny korelace mezi vzestupem horní hranice lesa všech lokalit a vzestupem horní hranice lesa bez antropogenního vlivu se zimním teplotním trendem za období 1901 – 2009 a korelace mezi vzestupem horní hranice lesa ovlivněné antropogenním vlivem s letním teplotním trendem za období, v kterých byla horní hranice lesa zkoumána.

Určitou podobnost lze najít mezi mnou vypracovanou praktickou částí a výzkumem, který prováděli Harsch et al. (2009). Na základě studií a případné osobní komunikace s autory, zkoumali postup horní hranice lesa v reakci na klimatické oteplování po celém světě po roce 1900. Výsledkem jejich práce bylo zjištění, že postup horní hranice lesa je pravděpodobně ovlivněn růstem teplot během zimy (Harsch et al. 2009). Ke stejnému výsledku jsem došel i ve své práci, kdy byla prokázána kladná korelace mezi vzestupem horní hranice lesa u všech lokalit a zimním teplotním trendem v období 1901 – 2009. Je ovšem nutné brát v úvahu metodologický postup, jelikož ve studii Harsch et al. (2009) není postup horní hranice lesa limitován výškou stromů, ale do postupu jsou zahrnovány i semenáčky a mladé stromky, které nepodléhají konvenčně stanovené minimální výšce 2 m nebo 3 m (Holtmeier 2009). Stejnou korelaci vzestupu se zimními teplotami potvrzuje i Kullman (2007), který ve svém výzkumu v jižní části švédských Skand zjistil, že zvyšující se teploty během zimního období měly za následek významné snížení úmrtnosti stromů, která byla způsobována hlavně zimním vysycháním (Kullman 2007).

Mezi horní hranicí lesa, u které nebyl zaznamenán žádný antropogenní vliv a zimním teplotním trendem za období 1901 – 2009 byla prokázána stejná korelace jako v předešlém případě. Jedná se hlavně o pohoří Ural a lokality v polárních oblastech. Jako jedna z příčin vysvětlující postup horní hranice lesa v těchto oblastech je kromě rostoucích teplot během léta a zimy, zvyšující se množství srážek hlavně během zimního období (Aune et al. 2011, Devi et al. 2008, Karpalov et al. 2006). Například na Severním Urale se během období mezi roky 1966 - 2006 zvýšilo množství srážek během zimy z 302 mm na 407 mm (Karpalov et al. 2006). Zvyšující se tloušťka sněhové pokrývky hraje proto důležitou roli z hlediska ochrany mladých stromků před poškozením mrazem a větrem (Holtmeier 2009).

U horní hranice lesa, která byla vystavena antropogennímu vlivu, byla prokázána kladná korelace s letním teplotním trendem počítaným pro období, v kterých byla horní

hranice lesa zkoumána. Podle Holtmeier a Broll (2007) závisí postup horní hranice lesa primárně na úspěšné regeneraci a na přežití mladých stromků, k čemuž přispívá teplejší letní období.

U skupiny 1, která se vyznačuje nízkými až zápornými teplotními trendy a patří do ní zejména Karpaty, Hrubý Jeseník a některé lokality v polárních oblastech, nebylo zjištěno, že by antropogenní vliv ovlivňoval vzestup horní hranice lesa. Tento výsledek je poněkud překvapivý, jelikož v Karpatech a v Hrubém Jeseníku je antropogenní vliv považován jako jeden z nejdůležitějších faktorů ovlivňující polohu horní hranice lesa (Tremel a Chuman 2014, Sitko a Troll 2008). Skupina 2 je charakteristická vyššími teplotními trendy než ve skupině 1 a patří do ní Alpy, Pyreneje, Krkonoše, jižní Skandy a Severní a Jižní Ural. U této skupiny bylo zjištěno, že metoda výzkumu má vliv na zkoumání vzestupu horní hranice lesa, což naznačuje, že dendrochronologická metoda nebo metoda leteckých snímků může mít významný vliv při zkoumání dynamiky horní hranice lesa.

Záporná korelace mezi vzestupy horní hranice lesa zjištěné dendrochronologickou metodou a oběma letními teplotními trendy naznačuje, že by tato metoda nemusela být vhodná pro zkoumání vzestupu horní hranice lesa. Podle Takahashiho (2014) je použití dendrochronologické metody nevhodné pro zkoumání vzestupu horní hranice lesa na místech, kde je vysoká mortalita stromů. Naopak kladná korelace mezi vzestupy horní hranice lesa zjištěné metodou leteckých snímků a ročním, letním, podzimním a zimním trendem za období 1901 – 2009 a letním trendem počítaným pro období, v kterých byla horní hranice lesa zkoumána, naznačuje, že by metoda leteckých snímků mohla být vhodnější pro zkoumání vzestupu horní hranice lesa než metoda dendrochronologická. Dendrochronologickou metodou je zkoumán spíše současný stav horní hranice lesa, který nemusí být platný po delší dobu, ale jen pro období několika málo let, zatímco u porovnání leteckých snímků je možné zachytit přesný posun horní hranice lesa v období několika desítek let. Přesto je dendrochronologická metoda převažující metodou ve výzkumu dynamiky horní hranice lesa (Harsch et al. 2009). Mnoho autorů však ve svých výzkumech kombinují obě metody, např. Leonelli et al (2011) nebo Mathisen et al (2014).

Platnost výsledků je do určité míry ovlivněna hlavně kvalitou použitých dat, zejména teplotními záznamy. Teplota není většinou nikdy měřena přímo na horní hranici lesa, ale je čerpána z teplotních záznamů meteorologických stanic, které jsou často vzdálené až několik desítek kilometrů a také se nacházejí v mnohem nižší nadmořské

výšce než ekoton horní hranice lesa. Například Karpalov et al. (2006), který vysvětluje vzestup horní hranice lesa na Severním Uralu růstem teplot a zvyšujícím se množstvím srážek, čerpal klimatická data ze stanic vzdálené 60 km a 125 km a nacházející se ve výšce 187 m a 408 m, ačkoli horní hranice lesa v této oblasti dosahuje výšky kolem 1000 m. Mnou použitá databáze CRU TS 3.10, z které jsem čerpal pro výpočet teplotních trendů, je vytvořena na základě interpolace teplotních záznamů na síti s rozlišením $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ z více jak 4000 stanic po celém světě a právě interpolované teplotní záznamy v odlehlých lokalitách mohou být velmi odlišné od reálných teplot.

Je těžké stanovit, který z faktorů hraje důležitější úlohu z hlediska postupu horní hranice lesa. V nenarušených oblastech je rostoucí teplota považována za hlavní faktor řídící vzestup horní hranice lesa (Shiyatov et al. 2007), zatímco v lokalitách ovlivněných lidskou činností se k teplotě přidává ještě antropogenní vliv, který je podle některých autorů pokládán za hlavní faktor řídící vzestup (např. Gehrig-Fasel et al. 2007, Sitko a Troll 2008). Na základě literatury a vytvořené databáze, bych se přikláněl k teorii, že postup horní hranice lesa je řízen kombinací obou faktorů, jak teplotou, tak antropogenním vlivem (např. Treml a Chuman 2014).

5. Závěr

Ve své práci jsem zjistil, že vzestup horní hranice lesa v Evropě koinciduje zejména s rostoucími teplotami během zimního období. Stejný výsledek platí i pro horní hranici lesa bez antropogenního vlivu. Ke stejnému zjištění došli i Harsch et al. (2009) a Kullman et al. (2007). Vzestup horní hranice lesa, která je vystavena antropogennímu vlivu, je svázán spíše s teplotami během léta. Zdá se, že metoda výzkumu by mohla hrát významnou roli při zkoumání dynamiky horní hranice lesa. Dendrochronologická metoda se jeví být jako nevhodná pro zkoumání vzestupu horní hranice lesa například v lokalitách, kde je vysoká mortalita stromů. Jako vhodnější se zdá být metoda leteckých snímků, která je schopna zachytit přesný posun horní hranice lesa.

Je obtížné určit, zda je vzestup řízen spíše teplotně nebo změnou využití půdy. V nedotčených oblastech je vzestup horní hranice lesa ovlivňován hlavně růstem teplot nebo zvyšujícími se srážkami, zatímco v lokalitách ovlivněných člověkem je vzestup připisován spíše snižujícími se antropogennímu vlivu. Celkově je vzestup horní hranice lesa spíše řízen kombinací obou faktorů hlavně v oblastech ovlivněných lidskou činností.

6. Seznam použité literatury

- AUNE, S., HOFGAARD, A. & SÖDERSTRÖM, L. (2011): Contrasting climate- and land-use-driven tree encroachment patterns of subarctic tundra in northern Norway and the Kola Peninsula. *Canadian Journal of Forest Research*, 41, s. 437 – 449
- CAMARERO, J. J., GUTIÉRREZ, E. (2004): Pace and pattern of recent treeline dynamics: response of ecotones to climatic variability in the Spanish Pyrenees. *Climatic Change*, 63, s. 181 – 200
- DALEN, L., HOFGAARD, A. (2005): Differential Regional Treeline Dynamics in the Scandes Mountains. *Arctic. Antarctic and Alpine Research*, 37, s. 284-296
- DEVI, N., HAGEDORN, F., MOISEEV, P., BUGMANN, H., SHIYATOV, S., MAZEPA, V., RIGLING, A. (2007): Expanding forests and changing growth forms of Siberian larch at the Polar Urals treeline during the 20th century. *Global Change Biology*, 14, s. 1581 - 1591
- DÍAZ-VARELA, R. A., COLOMBO, R., MERONI, M., CALVO-IGLESIAS, M. S., BUFFONI, A., TAGLIAFERRI, A. (2010): Spatio-temporal analysis of alpine ecotones: A spatial explicit model targeting altitudinal vegetation shifts. *Ecological Modelling*, 221, s. 621 – 633
- FØRLAND, E. J., BENESTAD, R. E., FLATØY, F., HANSEN-BAUER, J., HAUGEN, J. E., ISAKSEN, K., SORTEBERG, A., ADLANDSVIK, B. (2009): Climate development in North Norway and the Svalbard region during 1900–2100 [report no. 128]. Norwegian Polar Institute, Tromsø, NO
- GEHRIG-FASEL, J., GUIBAN, A., ZIMMERMANN, N. E. (2007): Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate chase or land abandonment? *Journal of Vegetation Science*, 18, s. 571 - 582
- GRACE, J., BERNINGER, F. & NAGY, L. (2002): Impacts of climate change on the tree line. *Annals of Botany*, 90, s. 537 – 544
- HARSCH, M., HULME P., MCGLONE M., DUNCAN R. (2009): Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*, 12, s. 1040 – 1049
- HARSH, M., BADER, M. (2011): Treeline form – a potential key to understanding treeline dynamics. *Global ecology and biogeography*, 20, s. 582 – 596

- HOFGAARD, A., DALEN, L., HYTTEBORN, H. (2009): Tree recruitment above the treeline and potential for climate driven treeline change. *Journal of Vegetation Science*, 20, s. 1133 – 1144
- HOLTMEIER, FK., BROLL, G. (2009): Altitudinal and polar treelines in the Northern hemisphere – causes and response to climate change. *Polarforschung*, 79, č. 3, s. 139 – 153
- HOLTMEIER, FK. (2009): Mountain timberlines ecology. Patchiness, and dynamics. Springer, New York, 437 s. ISBN 978-1-4020-9705-8
- HOLTMEIER, FK., BROLL, G. (2005): Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global ecology and biogeography*, 14, s. 395 – 410
- HOLTMEIER, F. K., BROLL, G. (2007): Treeline advance – driving processes and adverse factors. *Landscape Online* 1, s. 1 - 33
- KAMMER, A., HAGEDORN, F., SHEVCHENKO, I., LEIFELD, J., GUGGENBERGER, G., GORYACHEVA, T., RIGLING, A., MOISEEV, P. (2009): Treeline shifts in the Ural mountains affect soil organic matter dynamics. *Global Change Biology*, 15, s. 1570 – 1583
- KARPALOV, D. S, SHIYATOV, S. G., MOISEEV, P. A., FOMIN, V. V. (2006): Changes in the composition, structure and altitudinal distribution of low forests at the upper limit of their growth in the northern Ural mountains. *Russian journal of ecology*, 37, s. 367 - 372
- KERN, Z, POPA, I.(2008): Changes of frost damage and treeline advance for Swiss stone pine in the Calimani Mts. (Eastern Carpathians, Romania). *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 4, 39 – 48
- KÖRNER, CH., PAULSEN, J. (2004): A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of biogeography*, 31, s. 713 – 732
- KÖRNER, CH (1998): A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115, s. 445 - 459
- KÖRNER, CH. (2007a): Climatic treelines: conventions, global patterns, causes. *Erdkunde*, 61, s. 316 – 324
- KÖRNER, CH. (2007b): The use of altitude in ecological research. *Trends Ecol. Evol.*, 22, s. 569 – 574
- KÖRNER, CH. (2012): Alpine treelines: functional ecology of the global high elevation tree limits. Basel, 220 s. ISBN 978-3-0348-0395-3

- KULLMAN, L. (2007): Tree line population monitoring of *Pinus sylvestris* in the Swedish Scandes, 1973-2005: implications for tree line theory and climate change ecology. *J. Ecology*, 95, s. 41 – 52
- KULLMAN, L., ÖBERG, L. (2009): Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective. *Journal of Ecology*, 97, s. 415 - 429
- LEONELLI, G., PELFINI, M., MORRA DI CELLA, U., GARAVAGLIA, V. (2011): Climate warming and the recent treeline shift in the European Alps: the role of geomorphological factors in high-altitude sites. *Ambio*, 40, s. 264 – 273
- MATHISEN, I. E., MIKHEEVA, A., TUTUBALINA, O. V., AUNE, S., HOFGAARD, A. (2014): Fifty years of tree line change in the Khibiny Mountains, Russia: advantages of combined remote sensing and dendroecological approaches. *Applied Vegetation Science*, 17, s. 6 – 16
- MARTAZINOVA, V., IVANOVA, O., SHANDRA, O. (2011): Climate and treeline dynamics in the Ukrainian Carpathians Mts. *Folia Oecologica*, 38, s. 66 – 72
- MITCHELL, T.D., JONES, R. G. (2005): An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 25, s. 693 – 712.
- MOTTA, R., NOLA, P. (2001): Growth trends and dynamics in sub-alpine forest stands in the Varaita Valley (Piedmont, Italy) and their relationships with human activities and global change. *Journal of Vegetation Science*, 12, s. 219 – 230
- PAULSEN, J., KÖRNER, CH. (2001): GIS-analysis of tree-line elevation in the Swiss Alps suggests no exposure effect. *Journal of Vegetation Science*, 12, s. 817 - 824,
- PEÑUELAS, J., BOADA, M. (2003): A global change-induced biome shift in the Montseny mountains (NE Spain). *Global Change Biology*, 9, s. 131- 140
- PIERMATTEI, A., RENZAGLIA, F., URBINATI, C. (2012): Recent expansion of *Pinus nigra* Arn. above the timberline in the central Apennines, Italy. *Annals of Forest Science*, 69, s. 509 – 517
- SHIYATOV, S. G., THERENTIEV, M. M., FOMIN, V.V., ZIMMERMANN, N.E. (2007): Altitudinal and horizontal shifts of the upper boundaries of open and closed forests in the Polar Urals in the 20th century. *Russian Journal of Ecology*, 38, s. 223 – 227
- SITKO, I., TROLL, M. (2008): Timberline Changes in Relation to Summer Farming in the Western Chornohora (Ukrainian Carpathians). *Mountain Research and Development*, 28, s. 263 - 271

- SUTINEN, R., NÄRHI, P., MIDDLETON, M., HÄNNINEN, P., TIMONEN, M., SUTINEN, M-L.(2012): Advance of Norway spruce (*Picea abies*) onto mafic Lommoltunturi fell in Finnish Lapland during the last 200 years. *Boreas*, 41, s. 367 - 378.
- SVEINBJÖRNSSON, B. (2000): North American and European treelines: external forces and internal processes controlling position. *Ambio*, 29, č. 7, s. 388 – 395
- TAKAHASHI, K. (2014): Effects of wind and thermal conditions on timberline formation in central Japan: a lattice model. *Ecological Research*, 29, s. 121 - 131
- TREML, V., CHUMAN, T. (2014): Spatial and temporal patterns of treeline shifts in the 20th century, Sudetes Mountains, Czech Republic. *Antarctic, and Alpine Research*, v recenzním řízení
- VAN BOGAERT, R., HANECA, K., HOOGESTEGER, J., JONASSON, CH., DE DAPPER, M., CALLAGHEN, T. V. (2011): A century of tree line changes in sub-Arctic Sweden shows local and regional variability and only a minor influence of 20th century climate warming. *Journal of Biogeography*, 38, s. 907 – 921
- VITTOZ, P., RULENCE, B., FRELÉCHOUX, F. (2008): Effects of climate and land-use change on the establishment and growth of cembra pine (*Pinus Cembra* L.) over the altitudinal treeline ecotone in the Central Swiss Alps. *Arctic Antarctic Alpine Research*, 40, s. 225 – 232.
- WALLENTIN, G., TAPPEINER, U., STROBL, J., TASSER, E. (2008): Understanding alpine tree line dynamics: An individual-based model. *Ecological Modelling*, 218, s. 235 - 246
- WEISBERG, P. J., SHANDRA, O., BECKER, M. E. (2013): Landscape influences on recent timberline shifts in the Carpathian mountains: abiotic influences modulate effects of land-use change. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 45, s. 404 – 414
- WONNACOTT, T. H., WONNACOTT, R. J. (1993): *Statistika pro obchod a hospodářství*. Victoria Publishing, Praha, 891 s. ISBN 80-85605-09-0

Gridová teplotní databáze CRU TS 3.10 [cit. 20.5.2014]. Dostupné z: <http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>

7. Přílohy

Seznam snímků horní hranice lesa zájmových lokalit pořízených ve stejném měřítku pomocí aplikace Google Earth

Snímek 1: Polární Ural

Snímek 2: Severní Ural

Snímek 3: Jižní Ural

Snímek 4: Severní Skandy – Abisko

Snímek 5: Švédské Skandy

Snímek 6: Severní Fennoskandinávie - Lommoltunturi

Snímek 7: Chibiny – Tuliok

Snímek 8: Chibiny – Yumechorr

Snímek 9: Krkonoše

Snímek 10: Hrubý Jeseník

Snímek 11: Ukrajinské Karpaty – Beskid

Snímek 12: Ukrajinské Karpaty – Gorgan

Snímek 13: Ukrajinské Karpaty – Poloniny

Snímek 14: Ukrajinské Karpaty – Marmarosh

Snímek 15: Ukrajinské Karpaty – Chornogora

Snímek 16: Rumunské Karpaty - Kalimanské hory

Snímek 17: Rakouské Centrální Alpy – Ötztal

Snímek 18: Italské alpy - Val Masino

Snímek 19: Italské alpy) - Valle d'Aosta

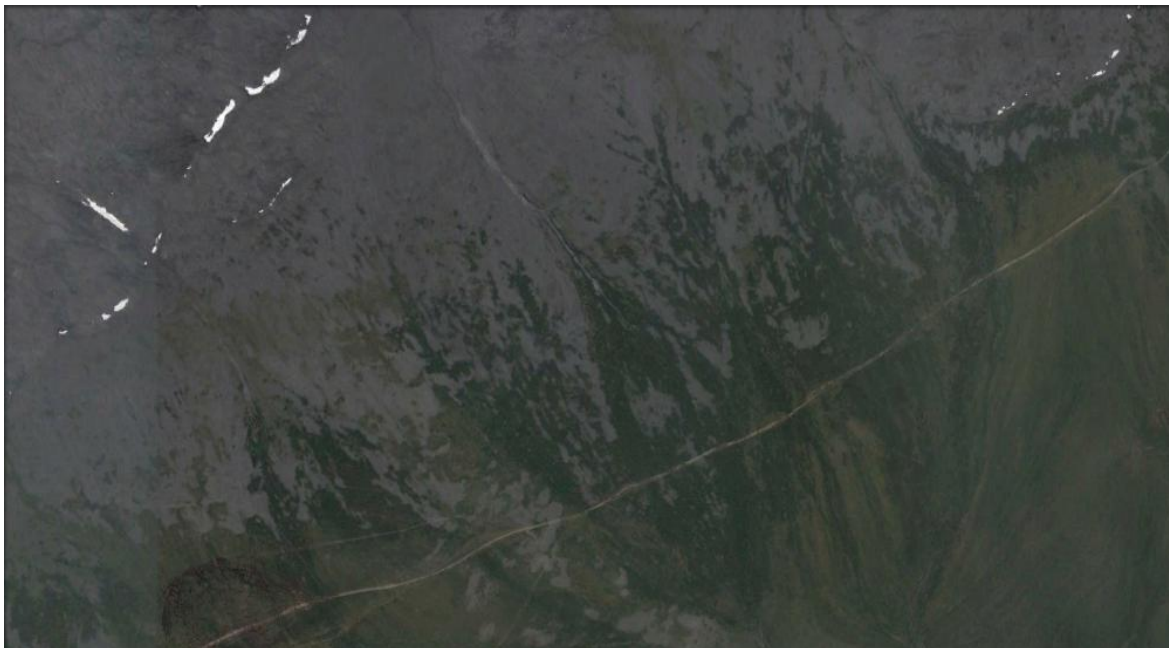
Snímek 20: Katalánsko - Masiv Montseny

Snímek 21: Pyreneje – Ordesa

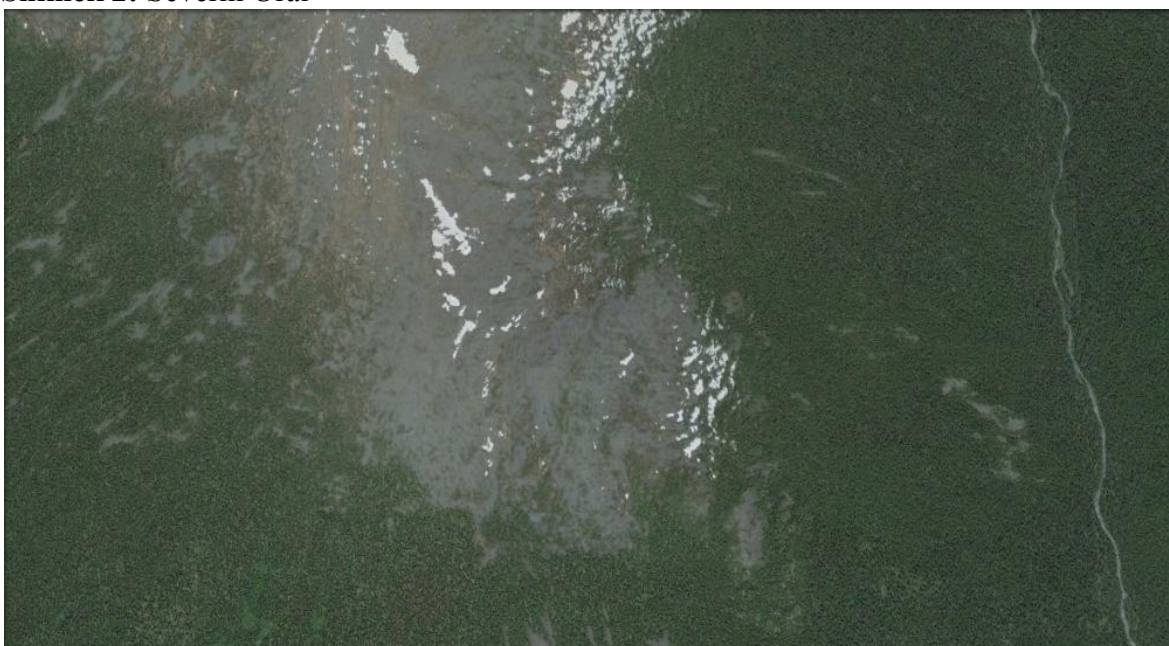
Snímek 22: Pyreneje – Tessó

Snímek 23: Pyreneje - Estany de la Pera

Snímek 1: Polární Ural



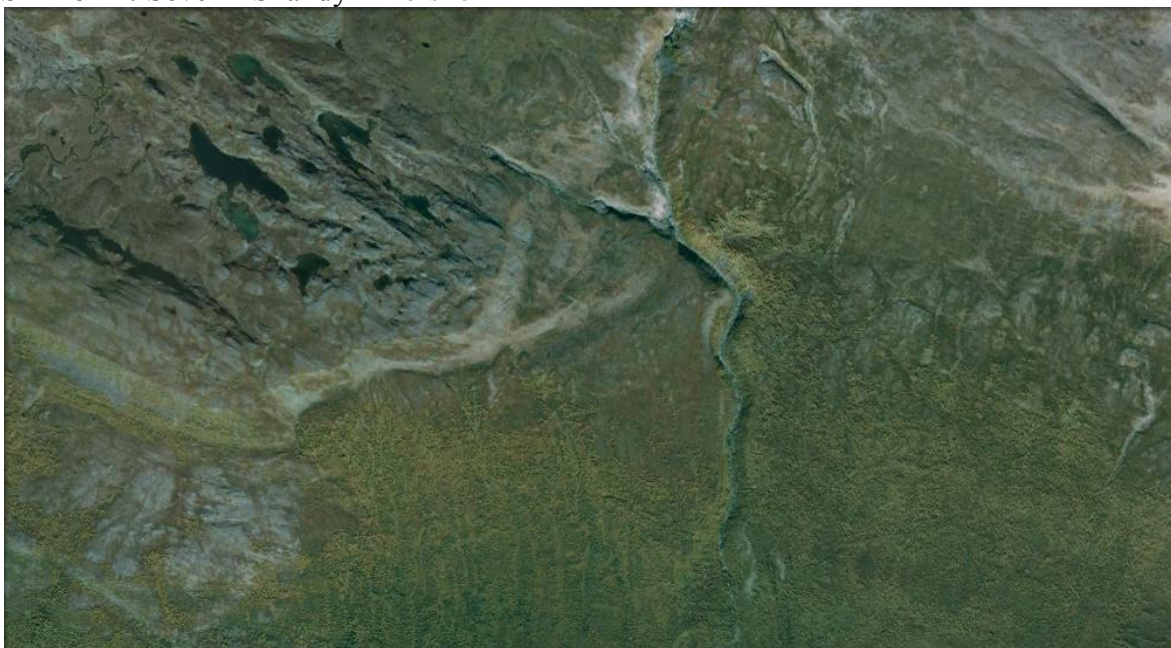
Snímek 2: Severní Ural



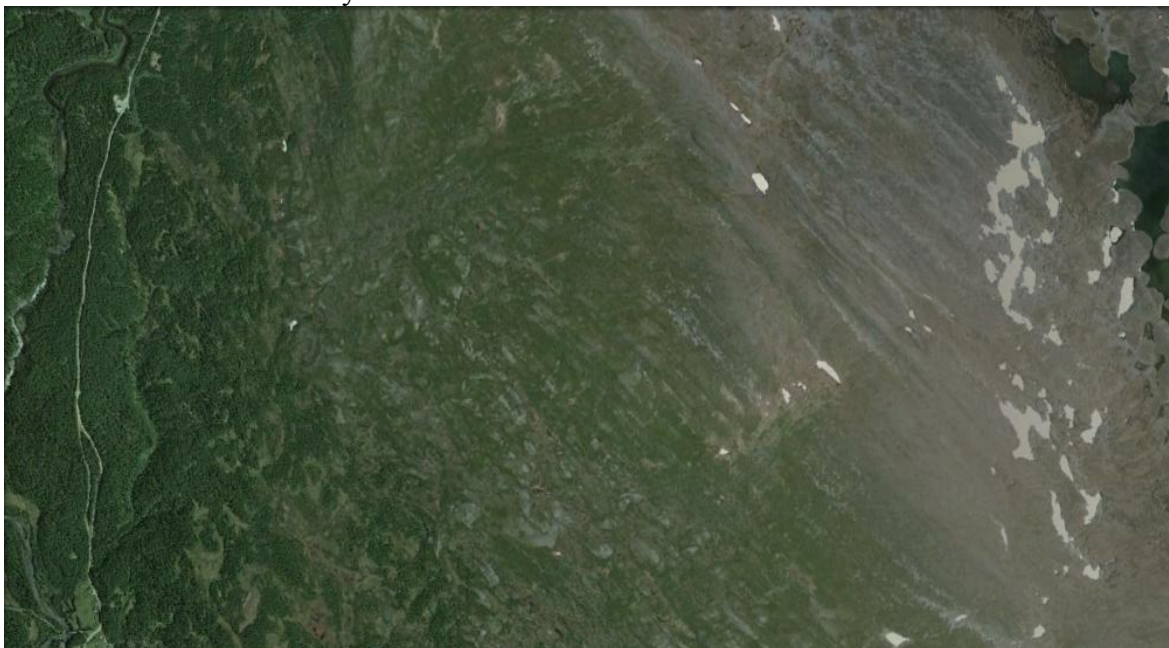
Snímek 3: Jižní Ural



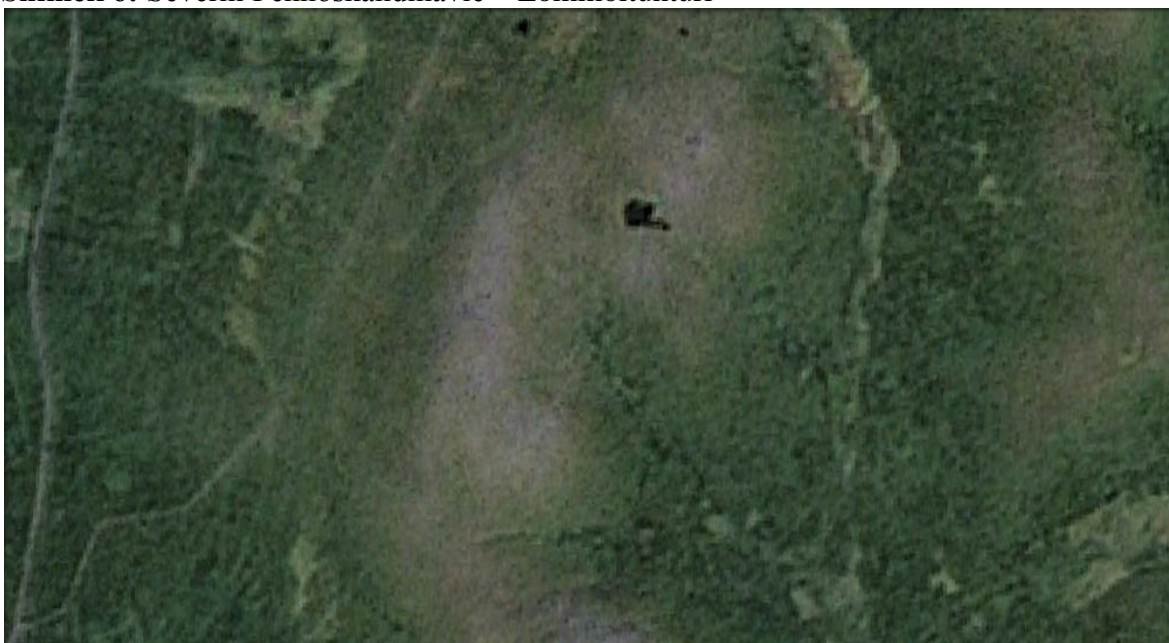
Snímek 4: Severní Skandy – Abisko



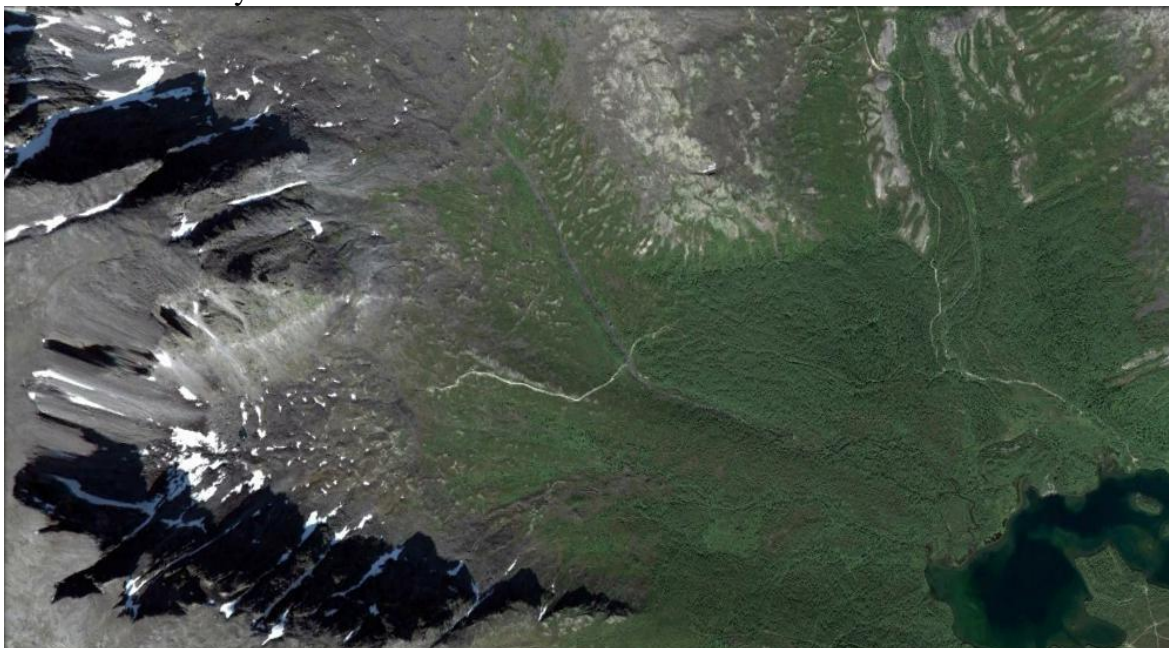
Snímek 5: Švédské Skandy



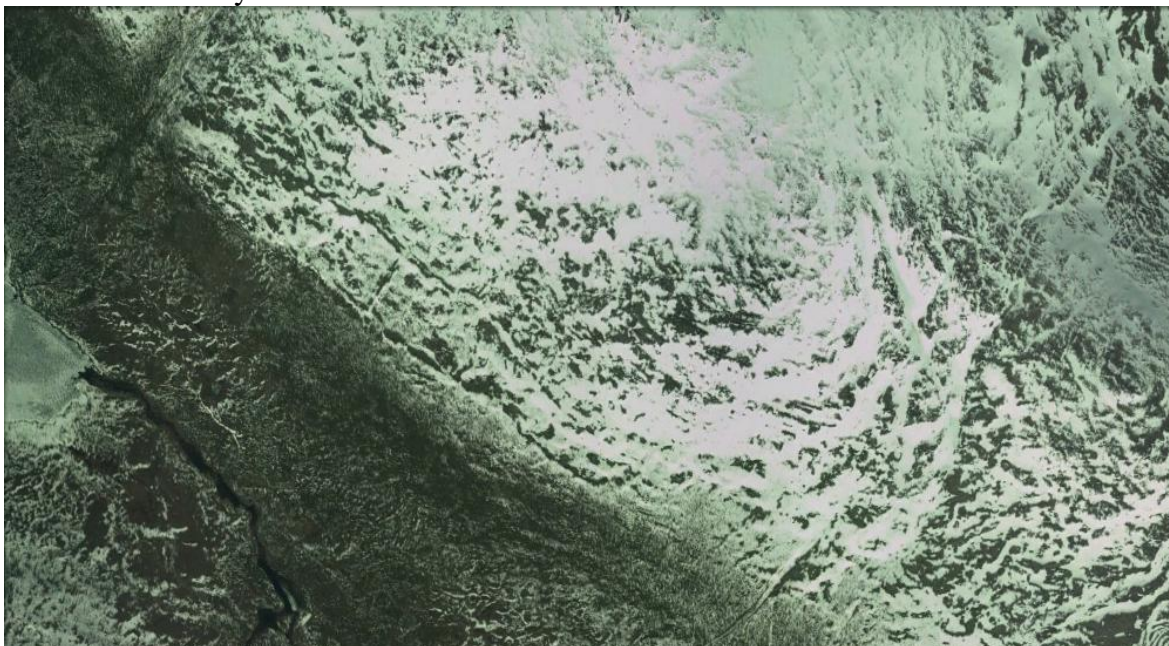
Snímek 6: Severní Fennoskandinávie – Lommoltunturi



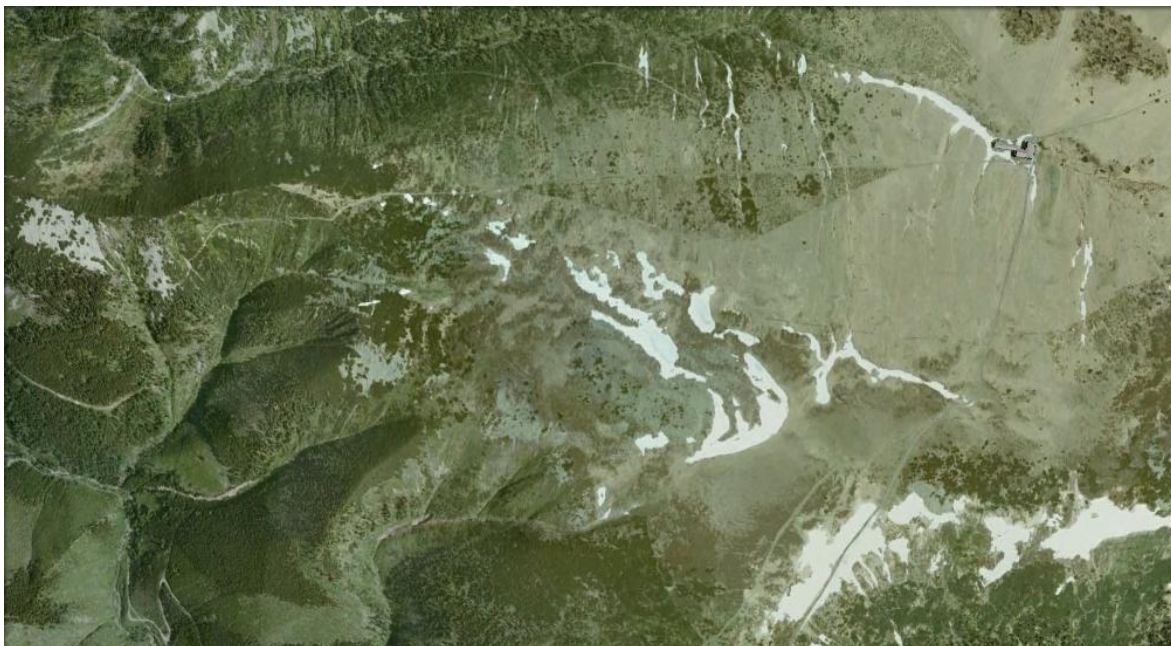
Snímek 7: Chibiny – Tuliok



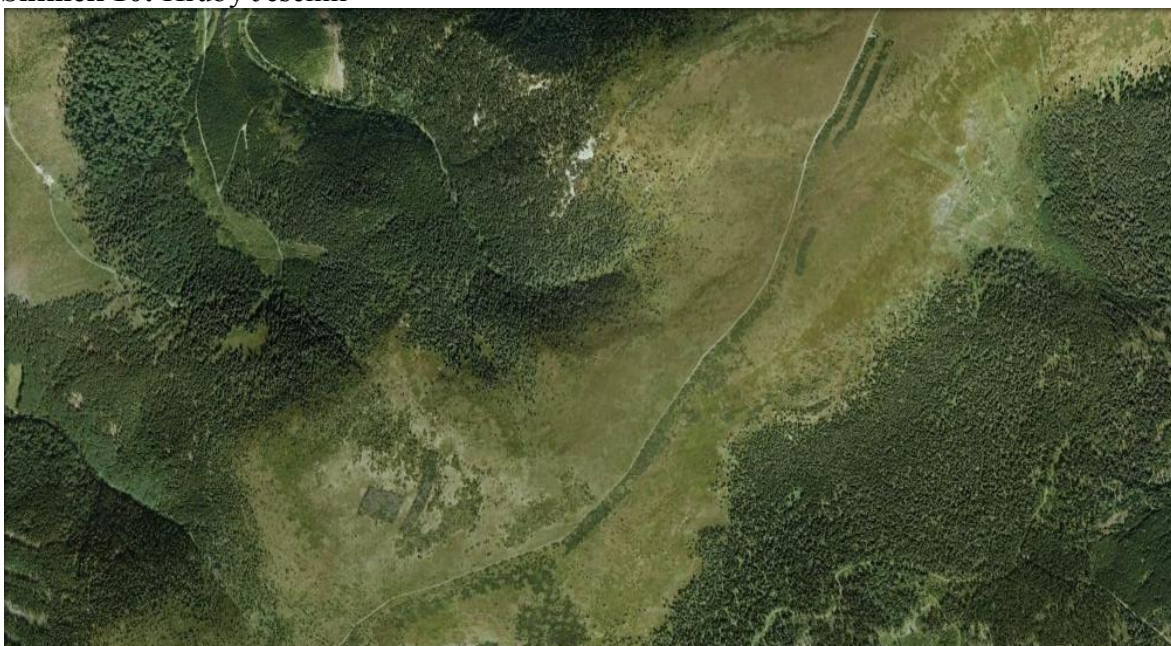
Snímek 8: Chibiny – Yumechorr



Snímek 9: Krkonoše



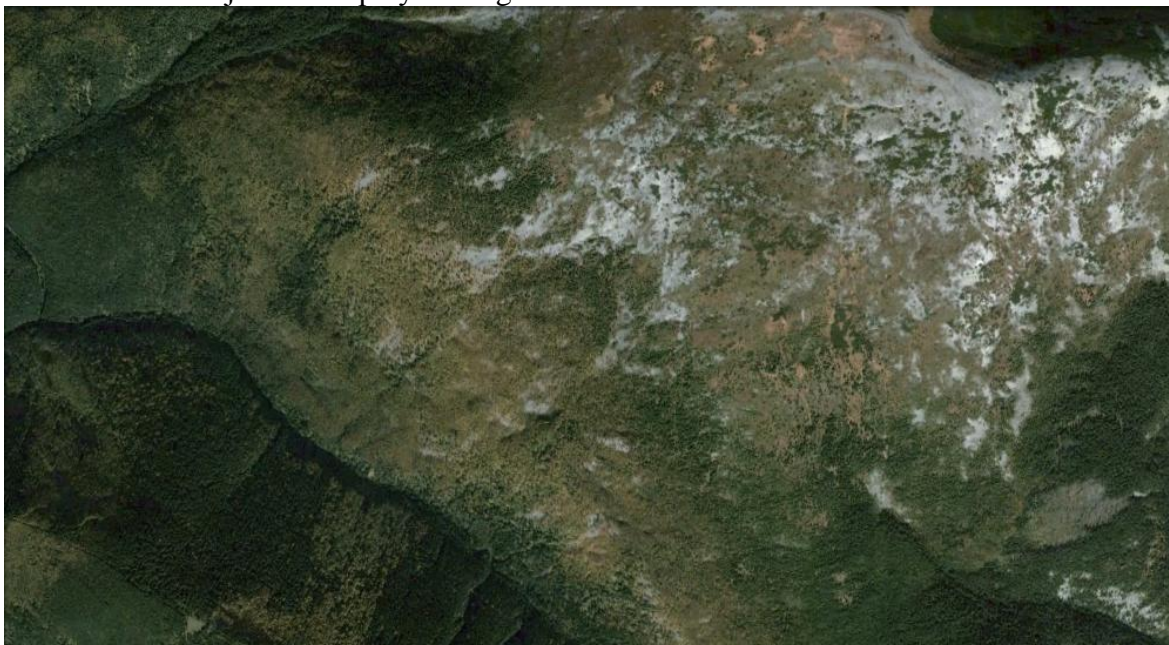
Snímek 10: Hrubý Jeseník



Snímek 11: Ukrajinské Karpaty – Beskid



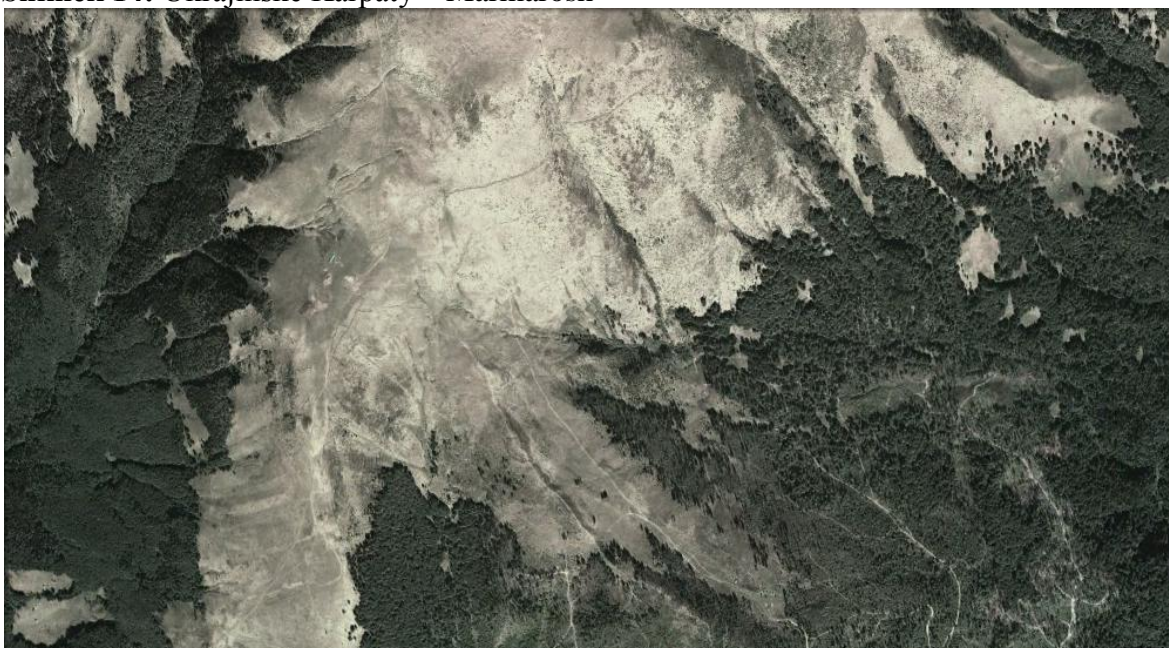
Snímek 12: Ukrajinské Karpaty – Gorgan



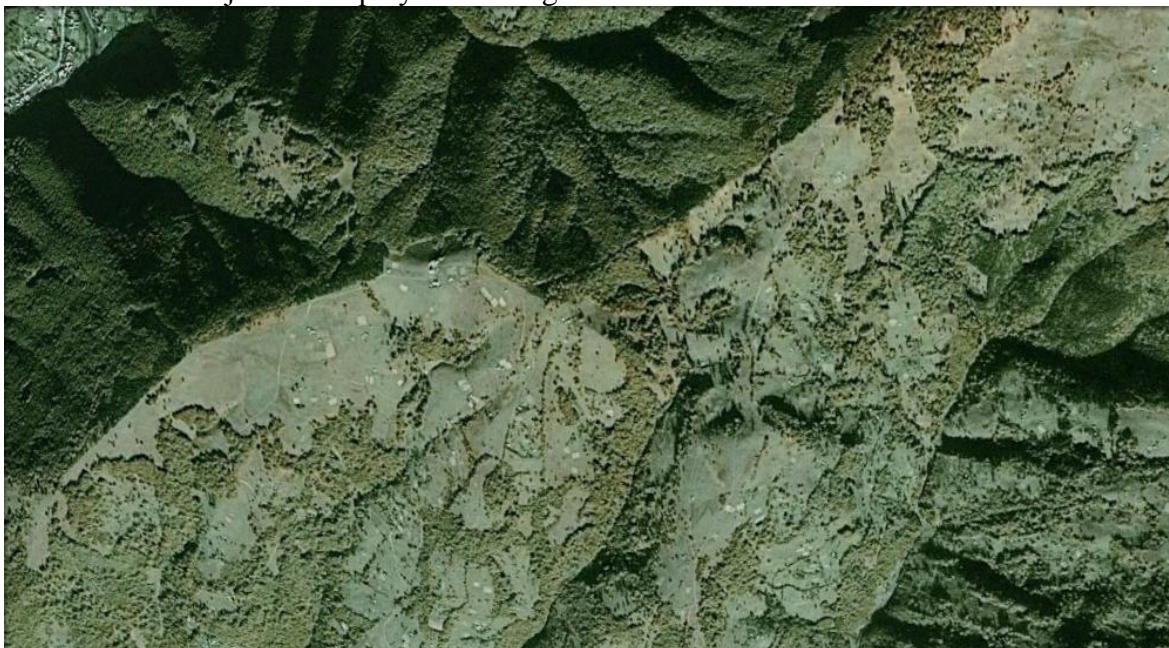
Snímek 13: Ukrajinské Karpaty – Poloniny



Snímek 14: Ukrajinské Karpaty – Marmarosh



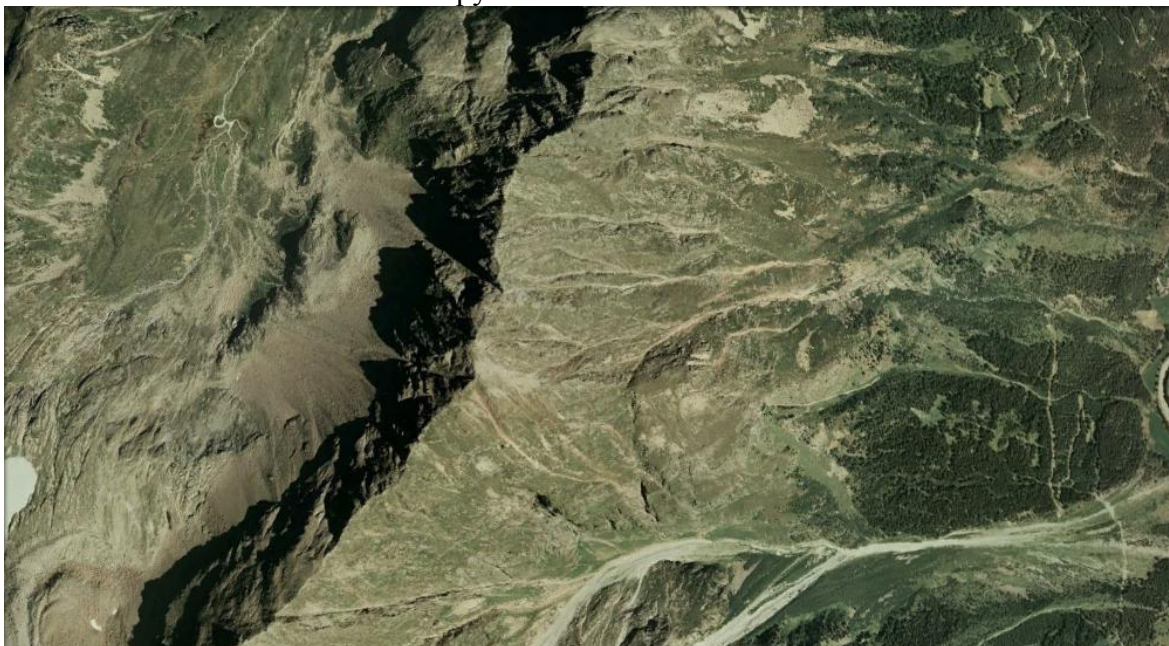
Snímek 15: Ukrajinské Karpaty – Chornogora



Snímek 16: Rumunské Karpaty - Kalimanské hory



Snímek 17: Rakouské Centrální Alpy – Ötztal



Snímek 18: Italské alpy - Val Masino



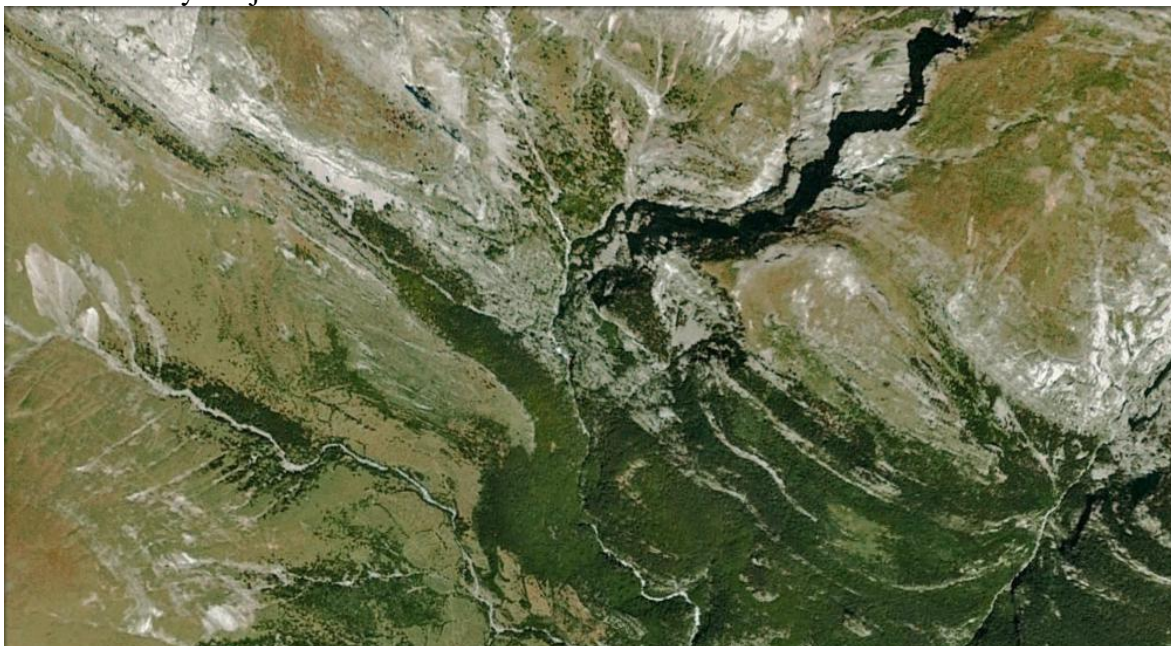
Snímek 19: Italské alpy - Valle d'Aosta



Snímek 20: Katalánsko - Masiv Montseny



Snímek 21: Pyreneje – Ordesa



Snímek 22: Pyreneje – Tessó



Snímek 23: Pyreneje - Estanys de la Pera

