

**Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Geografie a kartografie



Alina Yakubouskaya

**POLOHA HORNÍ HRANICE LESA VE VYSOKÉ ASII A
JEJÍ VZTAH K TEPLOTNÍM POMĚRŮM**

**ALPINE TREELINES IN THE HIGH ASIA AND THEIR
RELATION TO TEMPERATURES**

Bakalářská práce

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

Praha 2011

Děkuji svému školiteli Mgr. Václavu Tremlovi, Ph.D. za odborné konzultace, trpělivost a řadu cenných rad, které mi ke zpracování práce poskytl. Dále bych ráda poděkovala RNDr. Zbyňku Engelovi, Ph.D. za poskytnutou literaturu.

Zároveň bych chtěla poděkovat svému příteli Janu Kofroňovi za podporu při psaní bakalářské práce.

Prohlášení:

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

V Praze, 30.05.2011

Podpis:

OBSAH

1. ÚVOD	9
2. DEFINICE POJMU HORNÍ HRANICE LESA	11
3. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ POLOHU HORNÍ HRANICE LESA	14
3.1. „Sink limitation hypothesis“.....	17
3.2. „Source limitation hypothesis“.....	18
3.2.1. „Nutrient limit hypothesis“.....	18
3.2.2. Nedostatečná uhlíková bilance.....	20
3.3. Teorie omezené reprodukce.....	22
3.4. Vliv modulativních faktorů na formování horní hranice lesa.....	25
4. KLASIFIKACE HORNÍ HRANICE LESA PODLE TVARU	27
5. PŘEHLED TEPLOTNÍCH INDIKÁTORŮ HORNÍ HRANICE LESA ... 30	
6. OBECNÝ PŘEHLED DRUHOVÉHO SLOŽENÍ HORNÍ HRANICE LESA V RŮZNÝCH KLIMATICKÝCH OBLASTECH	33
7. FYZICKO-GEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA STUDOVANÉHO REGIONU	35
7.1. Himálaj.....	35
7.2. Hindúkuš (Hindu-Kush).....	37
7.3. Pamír.....	39
7.4. Karakorám.....	42
7.5. Ťan-Šan.....	43
7.6. Tibet.....	44
7.7. Kunlun, Altyn-tagh, Nan-šan a Transhimálaje.....	46
8. VÝPOČET ZÁKLADNÍCH TEPLOTNÍCH CHARAKTERISTIK PRO URČENÉ POLOHY HORNÍ HRANICE LESA V DANÉ OBLASTI	47
DISKUZE	57
ZÁVĚR	62
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	64
SEZNAM PŘÍLOH	68

Seznam obrázků:

Obr. 1a:	Schematická reprezentace ekotonu horní hranice lesa s použitou nomenklaturou.....	12
Obr. 1b:	Reprezentace ekotonu horní hranice lesa pomocí leteckého snímku.....	12
Obr. 2:	Schematická ukázka klasifikace faktorů určujících horní hranici lesa podle 3. úrovní 14.....	16
Obr. 3:	Obsah nestrukturálních sacharidů v listech a větvích dle průměrných teplot vegetačního období v různých klimatických pásmech.....	22
Obr. 4:	Schematická ukázka stanoviště proměnlivého růstu dřevin v klečové i ve vzpřímené formě.....	24
Obr. 5:	Reakce různých tvarů horní hranice lesa na klimatické změny od roku 1900.....	27
Obr. 6:	Distribuce hlavních zonobiomů a orobiomů na Zemi.....	33
Obr. 7:	Variabilita základních jednotlivých charakteristik vegetačního období.....	49
Obr. 8:	Rozložení teplot nejteplejšího měsíce v °C.....	51
Obr. 9:	Rozložení teplot třech nejteplejších měsíců v °C	52
Obr. 10:	Rozložení teplot čtyř nejteplejších měsíců v °C	53
Obr. 11:	Rozložení teplot pěti nejteplejších měsíců v °C.....	54
Obr. 12:	Počet dnů s teplotou nad 5°C.....	55
Obr. 13:	Poloha horní hranice lesa ve vybraných lokalitách	56
Obr. 14:	Průměrná teplota vegetačního období na klimatických stanicích v systému Himálaj-Hindúkuš-Karakorám, °C.....	59

Seznam Tabulek:

Tab. 1:	Geografické rozmístění publikovaných výzkumů v ekotonu horní hranice lesa	9
Tab. 2:	Minimální výška stromů, jako kritérium pro určování horní hranice lesa	11
Tab. 3:	Vysvětlení základních pojmů souvisejících s horní hranicí lesa dle různých autorů.....	13
Tab. 4:	Základní údaje o studovaných pohořích.....	35
Tab. 5:	Průměrné srpnové teploty v různých zónách Himálají.....	36
Tab. 6:	Základní statistické charakteristiky vypočtené na základě M1, M3, M4, M5 a DM5.....	48

Úvod

Vysokohorské oblasti jsou jedním ze základních azonálních biomů (orobiomů) světa, přičemž pokrývají 6,7% souše (Prach et al. 2009, s. 97).

V horách můžeme rozlišit následující základní vegetační stupně podle stoupající nadmořské výšky: montánní, subalpínský, alpínský a nivální stupeň. Montánní stupeň je většinou vymezen horní hranicí lesa. Pro subalpínský jsou charakteristické křovinné formace, pro stupeň alpínský pak alpínské trávníky (Prach et al. 2009, s. 97).

Orobiomy představují nejvíce heterogenní biomy vůbec v měřítku decimetrů až stovek metrů kvůli velkým rozdílům v mikroklimatu. Členitý, často skalnatý povrch, se velmi různě ohřívá podle konkrétního slunečního osvětlení daného místa. Velmi odlišné jsou i vlhkostní poměry mezi jednotlivými částmi mikroreliefu. Teplotní a vlhkostní gradienty jsou krátké a strmé. Na to navazují i odlišné půdní a živinové poměry (Prach et al. 2009, s. 99, Scherrer, Körner 2010).

Často se měnící počasí, velké amplitudy teplot, nerovnoměrné rozložení srážek, výskyt katastrofických jevů (lavin, sesuvů atd.) vytváří extrémní podmínky pro výskyt rostlin, které musí vyvíjet různé adaptační mechanismy pro přežití.

Jednou ze základních otázek, zajímající vědce na celém světě již mnoho let, je otázka přechodu stromových forem rostlin ke keříčkovité a polštářkovité vegetaci na gradientu nadmořské výšky. K této změně růstových forem rostlin dochází na horní hranici lesa (dále HHL).

První snahy vysvětlit tento jev byly učiněny již v polovině 19. století Kernerem a Naegelem. Na konci 19. století se výzkum převážně prováděl na příkladu evropských Alp, odkud také pochází název „alpínská hranice lesa“ (tzv. horní hranice lesa), obvykle přijímaný na celém světě (Körner 1999).

Intenzivnější výzkum začíná od poloviny 20. století. Začaly vznikat nové hypotézy o formování HHL, a to od těch, co zdůrazňovaly vliv teploty na růst až k těm, co zdůrazňovaly vliv nízké intenzity fotosyntézy. Areál výzkumu se rozšířil na celý svět, i když nejvíce prostudovanou oblastí dodnes zůstávají Alpy a jiná evropská pohoří (viz tabulka 1).

Ostatních 28 % publikovaných prací je věnováno biologii stromové hranice a porovnání poloh HHL v globálním měřítku, ve snaze najít společné faktory určující její vznik (Körner 1999).

Tabulka 1: Geografické rozmístění publikovaných výzkumů v ekotonu horní hranice lesa (Körner 1999)

Podíl, %	Lokalita
31,8	Evropa
17,5	Severní Amerika
6,3	centrální a subtropická Asie
6,2	Andy
6,2	Japonsko, Nový Zéland, Austrálie
2,1	Nová Guinea, Havaji
1,9	Afrika

Nový impulz k výzkumu se objevil v 70 letech, když se ukázalo, že HHL je citlivým ekologickým indikátorem, rychle reagujícím na klimatické změny a antropogenní činnost. Tato vlastnost nabývá v dnešní době na významu v souvislosti se stoupající teplotou. Studium změn polohy HHL dává možnost předpovídat, například, vliv měnícího se klimatu na základní biomy, či studovat změny v obratu CO₂ a jeho dopady na skleníkový efekt atd. (Körner 1999).

Ve své práci jsem se pokusila popsat a vysvětlit polohu HHL v horách Vysoké Asie. Tato oblast je zajímavá tím, že je málo prostudovaná a naskýtá možnost k širšímu vlastnímu výzkumu. Oblast je charakteristická různorodými fyziko-geografickými podmínkami a lze ji proto považovat za dobrou základnu pro studium lokálních faktorů ovlivňujících maximální polohu růstu stromů, pro popis struktury rostlinných společenstev a jejich změn v závislosti na půdních i mikroklimatických podmínkách. Specifikem HHL studované oblasti je, že zde dosahuje nejvyšších poloh na Zemi (Prach et al. 2009, s. 97).

Hlavní cíle mé práce lze vyjádřit následovně:

- 1) popsat hlavní hypotézy, vysvětlující vznik HHL
- 2) určit konkrétní polohy HHL v horách Vysoké Asie a popsat druhy dřevin, které ji tvoří;
- 3) určit základní teplotní indikátory polohy horní hranice lesa ve Vysoké Asii.

Pro dosažení zvolených cílů jsem využila následující přístupy:

- a) průzkum literárních zdrojů a odborných publikací za účelem tvorby teoretické základny práce a základny pro praktické výpočty;
- b) výpočet teplotních charakteristik z teplotních databází pomocí programu ArcGis;
- c) porovnání svých výsledků s výsledky získanými v jiných pohořích světa.

2 Definice pojmu horní hranice lesa

Horní hranice lesa je komplexním přechodem mezi dvěma zásadně odlišnými typy ekosystémů: lesem a bezlesem v důsledku rostoucí nadmořské výšky a měnícího se klimatu. Jedná se o nejvýraznější fyziognomickou hranici v rámci výškové stupňovitosti a i proto lze považovat horní hranici lesa za jednu ze základních ekologických hranic (Schickoff 2005).

HHL se vymezuje na základě výšky stromů a zapojení porostů. Nicméně u různých autorů se v literatuře lze setkat s různými definicemi pojmu „strom“ (viz tabulka 2). Obecně lze říci, že horní hranice lesa je širší přechodovou zónou, kde se dílčí linie vymezují konvenčně.

Tabulka 2: Minimální výška stromů, jako kritérium pro určování horní hranice lesa (Richardson, Friedland 2009, Holtmeier 2009)

Autor	Minimální výška stromu, (m)
Troll (1973)	5
Körner (1998)	3
Wardle (1974)	2
Brockmann-Jerosch (1919)	5
Schröter (1926)	4–5
Leibundgut (1938)	5
Vincent (1938)	8
Rubner (1953)	6–8
Hermes (1955)	5
Plesnik (1959)	8
Jenic and Locvenc (1962)	5
Ellenberg (1963)	2
Holtmeier (1965)	> průměrná hloubka sněhové pokrývky
Hustich (1966)	5
Müller-Dombois and Ellenberg (1974)	2
Bernadzki (1976)	2
Kullman (1979)	2
Little (1979)	4
Piussi and Schneider (1985)	2
Timoney et al. (1992)	3–4
Hofgaard (1997a)	2
Paulsen et al. (2000)	3

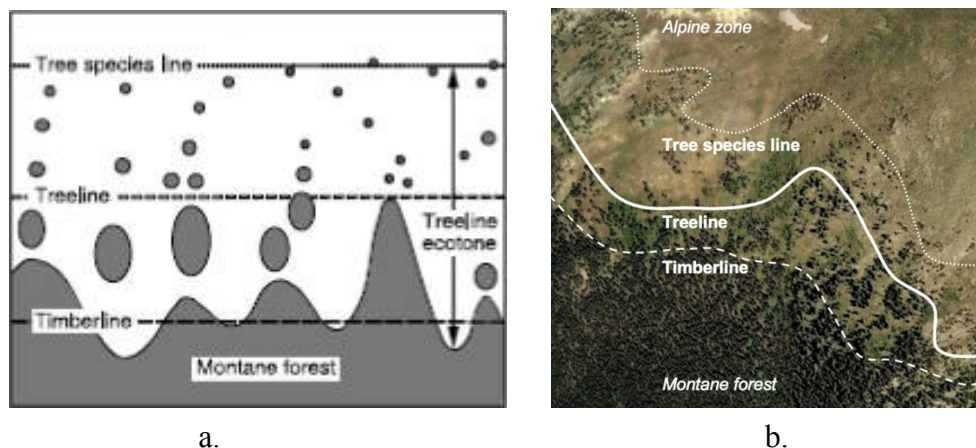
Je vidět, že minimální výška stromů pro určování HHL se značně liší podle různých autorů. Je to dáno specifiky každého výzkumu a závislostí tohoto kritéria na druhu porostu, tvořícího HHL. Například pro břizu (*Betula tortuosa*) je dostatečná výška 2,5 m, zatímco pro borovici (*Pinus sylvestris*) 5 m (Holtmeier 2009).

Podle Holtmeiera (2009), lze v mírném a subtropickém pásmu za optimální minimální výšku stromu brát hodnotu dostačující pro překonání střední hloubky sněhové pokrývky, a to 2 m. Již 2 m vysoký strom, nezávisle na druhu, je vystaven drsným klimatickým podmínkám a atmosférické cirkulaci. Takto vysoký strom si není schopen vytvořit své vlastní ochranné mikroklima na rozdíl od nízké křovité a polštářkovité vegetace.

Körner (1999) definuje strom, jako vzpřímenou dřevinu s dominantním nadzemním stonkem dosahujícím výšky minimálně 3 m (viz tabulka 3).

Schematická ukázka pojmů, týkajících se HHL je představena na obrázku 1.

Obrázek 1: a) schematická reprezentace ekotonu horní hranice lesa s použitou nomenklaturou (Körner, Paulsen 2004); b) reprezentace ekotonu horní hranice lesa pomocí leteckého snímku (Berdanier 2010)



Ve své práci budu užívat pojmu horní hranice lesa ve smyslu „tree line“, tj. jako spojnici výskytu nejvýše položených celků lesa v rámci svahů jednoho sklonu.

Tabulka 3: Vysvětlení základních pojmů souvisejících s horní hranicí lesa dle různých autorů (Holtmeier a Broll 2005, Holtmeier 2009, Körner 1999, Richardson a Friedland 2009, Sveinbjörnsson 2000)

	Timber line	Tree line	Forest line	Tree species line	Tree line ecotone	Krummholz line	Kampf zone
Körner (1999)	horní limit výskytu zapojených lesů	linie spojující nejvyšší celky lesa v rámci jednoho sklonu nebo série sklonů se stejnou expozicí	= treeline	hranice výskytu izolovaných stromů	Přechodová zóna mezi montánními lesy a „tree species line“	hranice výskytu zakrslých stromů s výškou do 2 m	zóna výskytu stromů s výškou nad 3 m
Sveinbjörnsson (2000)	„economic forest line“ s aktivní regenerací stromů	přibližný limit výškové distribuce vzpřímených stromů	hranice mezi zapojenými lesy a rozptýlenými stromy	hranice výskytu izolovaných stromů	-	-	-
Holtmeier (2009)	hranice mezi zapojenými lesy a rozptýlenými stromy	horní limit výskytu vzpřímených stromů	horní hranice výskytu zapojených lesů	horní limit výskytu zakrslých stromů (též „cripple line“ or „scrub line“)	-	= tree species line	-
Wardle (In. Richardson et al. 2009)	horní limit výskytu vysokých vzpřímených stromů	horní limit výskytu stromů a vysokých keřů (větších než 2 m)	hranice výskytu zapojených lesů	-	-	-	-
Daubenmire (1954)	-	horní limit výskytu stromů	nejvyšší celky lesa v rámci jednoho sklonu nebo série sklonů se stejnou expozicí	-	-	-	-

3 Faktory ovlivňující polohu horní hranice lesa

Všechny rostlinné druhy mají určité hranice svého výskytu, které jsou závislé na fyzikálních charakteristikách prostředí. Tyto limity jsou dané buď neschopností rostliny růst, nebo rozmnožovat se při daných ekologických podmínkách (Schickoff 2005).

Körner a Paulsen (2004) definují horní hranici lesa jako hranici bioklimatickou. Klimatická složka je především představovaná vlivem nízké teploty, která determinuje víceméně náhlý přechod dominantních životních forem rostlinných společenstev od vzpřímených stromů k polštářkovité vegetaci. V prostředí s nízkými teplotami rostliny musejí vyvíjet různé životní strategie pro přežití, jak na genetické, tak i na fyziologické úrovni (například, vegetativní rozmnožování, schopnost přežívat nepříznivé podmínky ve stavu dormance; Schickoff 2005). Nízké teploty zvyšují množství druhů charakteristických polyploidii, apomixii či druhů klonálních (Tranquillini 1979, Körner 1999).

Zhoršené klimatické podmínky se odráží i na taxonomickém složení HHL, kde převládají jehličnany. Jehlice jsou všeobecně odolnější k mrazu i k vysychání než jiné typy listů. Na povrchu mají silnou kutikulu a malé a zanořené průduchy, které mohou úplně uzavřít. Navíc, chloroplasty se u jehličnanů na zimu zmenšují a přecházejí do inaktivního stavu, což jim pomáhá snášet i silný mráz (Prach et al. 2009, s. 85). Opadavost rodu *Larix* brání tomu, že dřeviny nezačnou na jaře s rychlým oteplením hned asimilovat a transpirovat, protože půda bývá ještě zmrzlá. Další adaptací na drsné klimatické podmínky je forma koruny stromů. V případě jehličnanů platí, že čím je klima extrémnější, tím špičatější bývají jejich koruny (adaptace na množství sněhu, který po krátkých, dolů skloněných, větvích lépe sklouzne). V méně příznivých klimatických podmínkách je růst bočních větví inhibován dříve než růst hlavního vrcholu, do něhož příslušný jedinec vkládá přednostně energii (Prach et al. 2009, s. 85 - 86). Výška stromů na HHL je obecně také nižší než v jiných lokalitách. Dřeviny mají často klečovou formu, což jim napomáhá v tvorbě vlastního mikroklimatu a dává možnost využívat vyšších teplot při povrchu země (Heikkinen et al. 2002). Velmi důležitá je v tomto prostředí mykorhiza, pomáhající stromům v čerpání živin (vody a minerálních látek), kterých je ve vysokohorském prostředí nedostatek. Houbový symbiont zvětšuje absorpční povrch stromu, což je obzvláště důležité, když dřevina roste na živinově chudých půdách (Prach et al. 2009, s. 85).

Nižší vzrůst stromů na HHL je podmíněn limitovanou produkcí a ztrátou biomasy kvůli stresovým událostem, nízkým teplotám vegetačního období a nedostatku živin. Nepříznivé podmínky během vegetačního období (dlouhodobý mírný stres) vedou ke vzniku nízkých, ale vzpřímených stromů, naopak náhlé a krátkodobé stresové

událostí zase spíše vedou ke vzniku nízkých deformovaných stromů. Rozpad zápoje na HHL je vysvětlován především nízkou schopností přežití semen a velkým úhynem semenáčků nad hranicí lesa (Harsh, Bader 2011).

Výše uvedené adaptace dřevin spolu s ostatními geografickými faktory se uplatňují při vzniku ekotonu horní hranice lesa.

Podle prostorového měřítka, lze rozdělit faktory ovlivňující vznik HHL do dvou kategorií (Schickoff 2005):

- 1) Obecné nebo globální (nedostatečná teplota vzduchu a půdy během vegetačního období, krátké vegetační období);
- 2) Lokální nebo modulativní (extrémní klimatické podmínky podmíněné reliéfem, mráz, vítr, sníh a led, fyzikální a chemické vlastnosti půdy, disturbance, nedostatečná reprodukce, zvýšená kompetice).

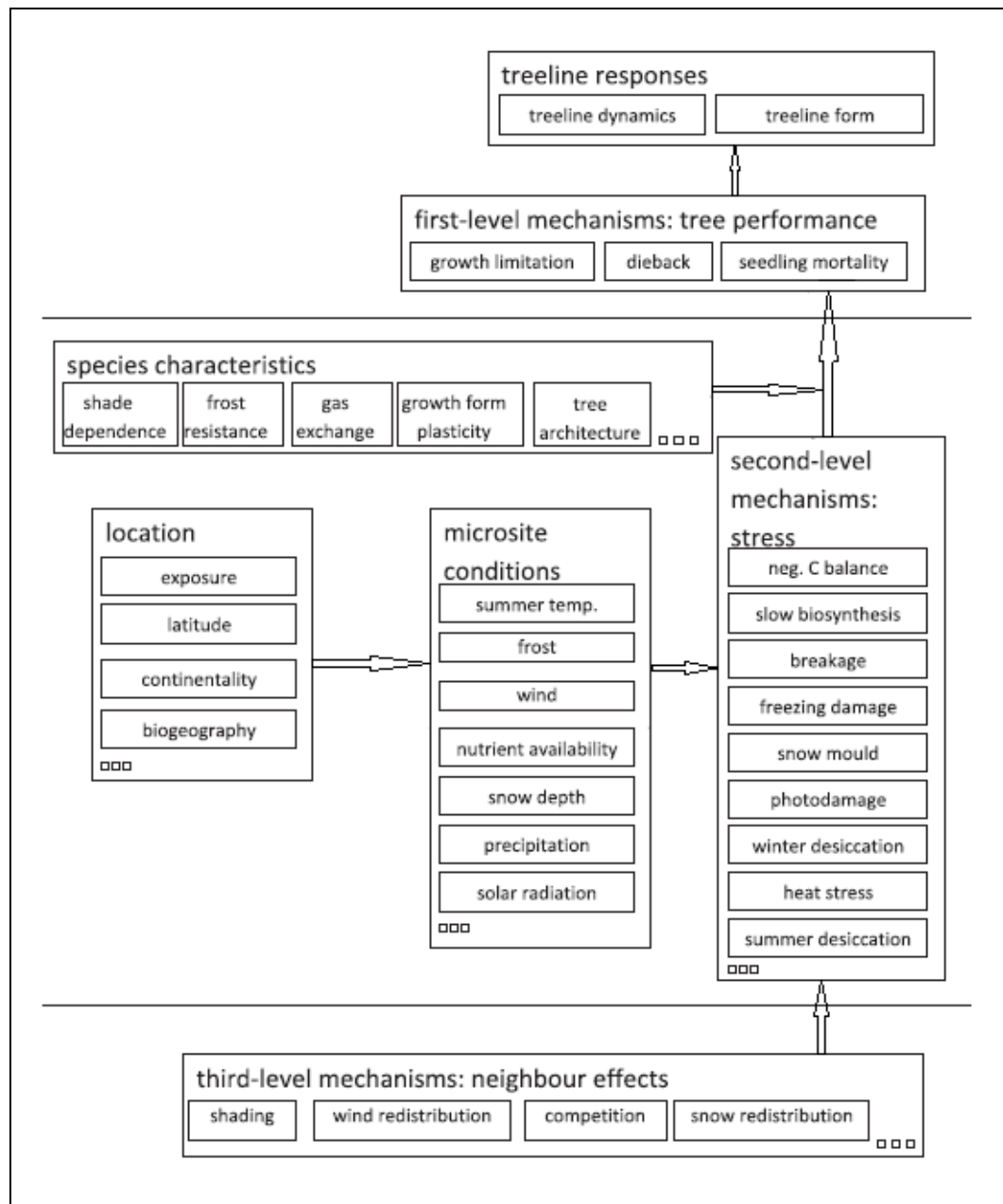
Někdy lze tyto faktory rozdělit do skupin podle jejich původu (Schickoff 2005, Holtmeier 2009, Smith et al. 2009):

- a) topoklimatické (radiace, teplota, délka vegetačního období, sněhová pokrývka);
- b) topografické (expozice, sklon, charakter terénu);
- c) závislé na ekologii stromových porostů (regenerace, rozptyl semen, stupeň sukcese);
- d) související s historickým vývojem (oscilace klimatu, požáry, vliv člověka, kalamity hmyzu);
- e) biotické (nemoci a škůdci);
- f) půdní (fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy, hloubka a teplota půdy, množství živin, vodní režim).
- g) antropogenní (kácení, pastevectví, rekreace a cestovní ruch).

Harsh a Bader (2011) navrhují rozdělení faktorů, kontrolujících růst stromů na HHL do třech úrovní (viz obrázek 2):

- 1) faktory, určující tvar a dynamiku HHL (faktory první úrovně): intenzita „growth limitation“, úhyn semenáčků a odumírání stromů;
- 2) stres v důsledku nízkých teplot, nízké asimilace uhlíku, výskytu sněžných plísni, větrné abraze, letního a zimního vysychání atd. (faktory druhé úrovně, závisí na druhovém složení HHL, poloze a mikroklimatických podmínkách);
- 3) kompetiční efekty (faktory třetí úrovně, stín, boj o živiny/vláhu, distribuce sněhu, stínění větru).

Obrázek 2: Schematická ukázka klasifikace faktorů určujících horní hranici lesa podle 3. úrovně (Harsh a Bader 2011, s. 6)



Z hlediska vysvětlení vlastního mechanismu působení nízkých teplot na vznik HHL lze vysledovat tři, respektive čtyři, hlavní globální hypotézy (Körner 1999), kterými se dále budu zabývat podrobněji:

- 1) „sink limitation hypothesis“ (Körner 1999);
- 2) „source limitation hypothesis“:
 - a) „nutrient limit hypothesis“;
 - b) nedostatečná uhlíková bilance;
- 3) teorie omezené reprodukce.

3.1 „Sink limitation hypothesis“

Omezený růst stromů na HHL je výsledkem dvou základních procesů: nedostatečného přírůstku biomasy a ztráty biomasy. Tyto dva procesy jsou podmíněny různými faktory a mají různý vliv na tvar HHL. Na rozdíl od ztráty, přírůstek biomasy, neboli růst stromu, probíhá jen v krátkém vegetačním období (je omezen nedostatkem živin a nízkými teplotami). Ztráta biomasy je výsledkem krátkodobých silných klimatických stresů v podobě mrazů, sněhu, větru atd. a vede k deformaci kmene a změně tvaru ekotonu (Harsh, Bader 2011).

Stromy jsou kvůli své architektuře více vystaveny vlivu atmosférické cirkulace. Je pro ně charakteristické menší prohřívání jejich bezprostředního okolí/povrchu a menší průměrné teploty vegetačního období. Husté koruny stromů brání prohřívání půdy a oteplování kořenového systému, což zhoršuje kořenovou aktivitu a výměnu tepla v půdě a vede ke ztrátě značné části příznivého období a většiny noci pro růst (Harsh, Bader 2011).

V této kapitole podrobněji rozeberu omezení růstu dřevin v důsledku nízkých teplot. Růst nových pletiv obecně vyžaduje (Körner 1999):

- 1) zmnožení genetické informace a embryonálních buněk;
- 2) tvorbu buněk a buněčných organel;
- 3) energii pro aktivaci syntetických procesů v buňce (respirační energie).

Nízké teploty mohou ovlivňovat výše uvedené procesy, například zpomalit metabolismus a syntézu buněčných struktur (Körner 1999). Nejvíce tento jev ovlivňuje stromy (křovinou vegetaci jen ve velkých nadmořských výškách, protože je značně závislá na mikroklimatu).

Tradičně je omezený růst stromů na HHL spjat s pomalejším procesem fotosyntézy za nízkých teplot ($4^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}$, Rosypal et al. et al. 2003, s. 229).

V nedávné době však bylo zjištěno, že množství energie vytvořené v buňce není zásadně limitováno nízkou teplotou (v buňkách je dostatek cukru). V některých případech byl pozorován i opačný efekt: množství cukru se s poklesem teploty zvětšovalo (Körner 1999). To znamená, že stavebních a zásobních látek je i při nízkých teplotách vytvořeno dostatek, ale nemohou být zabudovány do pletiv. Růst stromů na jeho výškovém maximu je tedy limitován spíše nízkou spotřebou asimilátů, než jejich produkcí (omezení je na straně „propadu“ vytvořených asimilátů, Körner 1999).

Důležitější je tedy pravděpodobně vliv teploty na dělení buněk (čím větší je teplota, tím rychleji probíhá dělení). Drastický pokles dělení je charakteristický pro teploty menší než 20°C . Při 20°C proběhne jedno dělení za 24 hodin, při 10°C až za 48 hodin. Při teplotě menší než 0°C je dělení buněk pomalé a růst stromů téměř přestává.

Řada výzkumů ukazuje, že minimální teplotou pro dělení buněk je u jehličnanů 5°C, což více méně koreluje s průměrnou teplotou vegetačního období na HHL 5,5°C – 7°C a ukazuje, že délka období s teplotou vyšší, než 5°C má opravdu omezující vliv na výskyt stromů v horských oblastech (Hoch et al. 2002, Körner 1999).

Je známo, že alpské rostliny mají méně buněk než rostliny nižších poloh (někdy až desetkrát méně). Kromě toho, listy mají výrazně menší velikost. Tvorba listu trvá od 3 do 4 týdnů, přitom dělení buněk se ukončuje, když list dosahuje 30 – 40 % své velikosti (končí produkce epidermálních buněk) (Körner 1999). Tento mechanismus tvorby nových orgánů lze považovat za jednu z adaptivních vlastností stromů na HHL na drsné klimatické podmínky panující v tomto prostředí. Takovýmto způsobem strom zachovává energii potřebnou pro respiraci.

Kromě toho růst stromů ve velké míře kontrolují hormony, které se vytváří v listech, kořenech a pupenech. Například auxiny podporují prodlužování buněk a zakořeňování řízků, gibbereliny podporují prodlužovací růst a přerušují dormanci, cytokininy jsou nezbytné pro dělení buněk. Nicméně, ve vyšších koncentracích, například auxin může působit toxicky, což v podstatě může být jednou z příčin neschopnosti rostlin zabudovat asimiláty do pletiv (Rosypal et al. 2003, s. 241).

Z výše uvedeného vyplývá, že teplota má důležitý vliv na průběh metabolických procesů v buňkách rostlin. Důležitějším však zde je určení onoho teplotního minima, které aktivuje tyto procesy. Mnoho výzkumů se věnuje této problematice. Provádí se výpočty různých teplotních indikátorů HHL a spočítá se jejich variabilita v různých vysokohorských oblastech (viz kapitola 5).

3.2 „Source limitation hypothesis“

Hypotéza „Source limitation“ vychází z předpokladu, že na horní hranici lesa existuje výrazný nedostatek základních zdrojů živin nezbytných pro růst a vývin stromů. Tato hypotéza se dělí na dvě varianty podle zdroje výživy, kterému je přikládána větší váha ve vztahu k formování HHL.

3.2.1 „Nutrient limit hypothesis“

Tato hypotéza vysvětlující vznik HHL staví na nedostatku a nízké dostupnosti půdních živin, zejména pak dusíku a fosforu, za nízkých teplot (Li et al. 2008, Sveinbjörnsson 1999). Dusík je hlavní složkou ribulosity a jiných fotosyntetických enzymů a struktur regulujících proces fotosyntézy v závislosti na environmentálních podmínkách, jako

jsou například nízké teploty. Fosfor je významný pro syntézu adenylátů a zabezpečení přenosu energie (Rosypal et al. 2003).

Jelikož podle některých autorů (např. Richardson et. al 2004) obsah dusíku v listech a jehlicích s rostoucí nadmořskou výškou klesá, dochází i k poklesu intenzity fotosyntézy, což je hlavní příčinou vedoucí ke vzniku HHL.

Jedinou možností růstu stromů na HHL v takovýchto podmínkách nedostatku dusíku je přítomnost půdních mikroorganismů hrajících klíčovou roli v regulaci dostupnosti živin přes mineralizaci organické hmoty a rozpouštění půdních minerálů (symbiotické mykorhizní vztahy), které se na HHL opravdu vyskytují ve velkém množství (Sveinbjörnsson et al. 2010).

Podle Sveinbjörnssona (1999), vztah půda – rostlina a rozdíly ve využití zdrojů živin vedou k ostré konkurenci mezi stromovitými porosty, keříčkovitou vegetací a bylinami v ekotonu HHL. Horní limit výskytu stromů tak silně kontrolují rhizosférními procesy (Wieser, Tausz 2007).

Obecně platí, že výskyt a intenzita mykorhizních vztahů silně závisí na nadmořské výšce, teplotě a na druhu porostu. Různé druhy dřevin selektivně stimulují růst různých mykorhizních druhů v závislosti na svých potřebách (Wieser, Tausz 2007). Například růst břízy na HHL je silně omezen nedostatkem dusíku, což vede k rozvoji silných mykorhizních vztahů. Jedle, *Abies fabri*, naopak, může růst i v podmínkách s nedostatečným množstvím dusíku, mykorhizní vztahy mohou být proto v tomto případě slabé (Li et al. 2008).

Růst jehličnanů, tvořících HHL ve většině pohoří mírného pásma, je ve značné míře založen na množství asimilátů akumulovaných během předcházejících vegetačních období stejně jako asimilátů obsažených ve starých jehlicích. Jedle, například, akumuluje v jehlicích 15 – 30 % asimilátů. Kvůli tomu má opad jehlic podstatné důsledky na růst a přežití stromů na HHL (Li et al. 2008).

Körner a Hoch (2003) ukázali, že obsah dusíku u stromů na HHL byl vyšší než u stromů nižších poloh. Uvedený jev lze vysvětlit tím, že při nízké teplotě se rostlina snaží kompenzovat malou efektivnost fyziologických procesů (větší množství dusíku v listech vede k intenzivnější fotosyntéze). Na druhou stranu, nízká teplota zmenšuje dostupnost dusíku kvůli snížení obratu a mineralizace organické hmoty. Což zase potvrzuje závislost růstu stromů na množství dostupných živin.

Nicméně Li et al. (2008) došli k závěrům, že menší obsah dusíku na HHL neomezuje růst stromů, ale spíše vede k větší pravděpodobnosti fyziologického (mrazového) poškození a vysoké mortalitě stromů na horním limitu jejich výskytu po dlouhé zimě (Traquillini 1979). Odolnost stromů proti mrazům je navíc spojována s obsahem sacharidů v pletivech, který je na jaře nízký (Li et al. 2008).

V každém případě, nedostatek živin vede buď k omezenému růstu stromů na HHL nebo k rozpadu zápoje a přechodu od vzpřímených dřevin ke klečovým formám.

Spolu s nízkými teplotami během vegetačního období to podmiňuje přechod od zapojených lesních porostů k bezlesí na gradientu nadmořské výšky.

3.2.2 Nedostatečná uhlíková bilance

Teorie nedostatečné uhlíkové bilance se zakládá na předpokladu, že celková fixace uhlíku fotosyntézou je vyvážena až převýšena ztrátami na respiraci a tvorbou biomasy (Sveinbjörnsson 2000).

S rostoucí nadmořskou výškou a poklesem teplot se zkracuje délka vegetačního období, což vede k poklesu intenzity fotosyntézy a množství fixovaného uhlíku (Richardson, Friedland 2009).

V takových podmínkách představuje strom relativně neefektivní růstovou formu. Potřebuje velké množství uhlíku na produkci kořenů a dřevěného kmenu. Pro vysoké stromy je tak těžké udržovat pozitivní uhlíkovou bilanci. To vede k jejich nahrazení nízkými stromy a keříčkovitou vegetací v ekotonu HHL (Richardson, Friedland 2009).

Sveinbjörnsson (2000) uvádí, že obrus ledem a sněhem a korespondující ztráta listů vede k sezónnímu snížení zisku uhlíku o 90 %. Zvyšující se kořenová respirace (větší růst kořenů během delšího dne) po zimě ještě více podporuje nedostatek uhlíku, což je alespoň v určité míře kompenzováno nižší půdní teplotou snižující jeho spotřebu.

Nicolussi et al. (1995) ve svém výzkumu ukázal, že v řádu desítek let stromy ve vyšších nadmořských výškách více zvýšily svůj radiální přírůst, což lze mj. spojit s rostoucím parciálním tlakem CO₂. Uvedené je obvykle charakteristické pro mladé semenáčky, převážně, když není jejich růst omezen jinými faktory. Výzkum dospělých stromů ukázal, že pokud stromy konkurují o jiný zdroj než o CO₂, nevykazují nebo vykazují jen mírnou reakci na zvyšování CO₂ (Hättenschwiler et al. 2002).

Důležitou roli v bilanci uhlíku hrají listy nebo jehlice, protože v sobě akumulují velké množství asimilátů. Z toho vyplývá, že větší životnost listů na HHL v porovnání s nižšími nadmořskými výškami představuje určitou fyziologickou adaptaci na drsné klimatické podmínky (Sveinbjörnsson 2000).

Velkou roli v pletivech rostlin hrají nestrukturální sacharidy. Na jejich množství závisí intenzita fotosyntézy a schopnost stromů k růstu po stavu dormance během chladné periody (Li et al. 2008, Körner 2003).

Otázkou zůstává, jestli se celkové množství nestrukturálních (tj. nestavebních) sacharidů v pletivech stromů na HHL liší podle ročního období nebo ne. Li et al. (2008) ukázal, že v dubnu je jejich obsah menší u stromů na HHL v porovnání se stromy z nižších poloh. To je vysvětlováno předcházejícím obdobím dormance (tj. stromy nespotřebovávají asimiláty). V červenci, během vegetačního období je jejich obsah u stromů obou poloh téměř stejný. Ke stejnému závěru došel i Körner (2003).

Dle Li et al. (2008) obsah nestrukturálních sacharidů v pletivech stromů závisí především na:

- a) druhu dřevin (nedostatek je charakteristický pro druhy rodu *Picea*, druhy rodu *Abies* naopak obsahují dostatek nestrukturálních sacharidů);
- b) expozici svahu (teplé a suché klimatické podmínky na jižních svazích mohou způsobit uzavření průduchů a vést ke snížení dostupnosti uhlíku).

Stromy rostoucí v podmínkách klimatického stresu mají nižší koncentraci nestrukturálních sacharidů než stromy rostoucí v normálním prostředí. To se však netýká oblastí s nedostatkem vody, protože voda omezuje jen samotný růst, nikoliv efektivitu fotosyntézy, která vede k akumulaci sacharidů (Li et al. 2008).

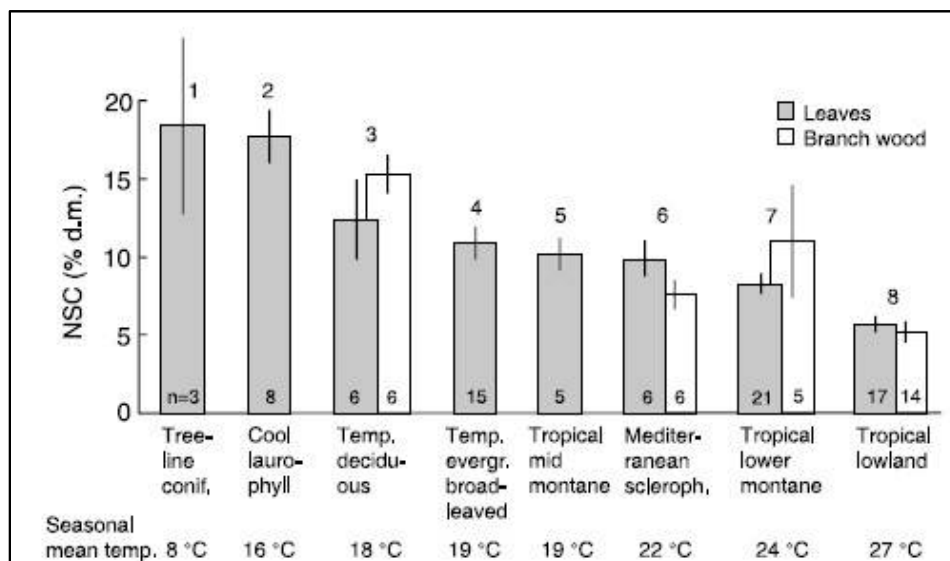
Zimní ztráty uhlíku (resp. biomasy), dané mrazovým poškozením pletiv zapříčiňujícím vysokou mortalitu stromů, částečně určují polohu HHL (Li et al. 2008, Tranquillini 1979).

Zdá se však, že teorie uhlíkové bilance zanedbává celou řadou důležitých faktů (Richardson, Friedland 2009):

- dostatečné množství vláhy na HHL tvoří příznivé podmínky pro proces fotosyntézy ve vysokých nadmořských výškách (oproti nižším nadmořským výškám);
- celková fixace uhlíku během vegetačního období je vysoká a plně stačí uspokojit potřeby pro respiraci i v zimě;
- absence vegetačních období v tropických šířkách vede k fixaci uhlíku během celého roku, uhlíková bilance je zde vždy pozitivní;
- množství asimilovaného CO₂ silně závisí na půdní teplotě a dostupnosti živin, jež se značně liší kvůli různorodosti mikroreliefu a mikroklimatu.

Kromě toho, v řadě výzkumů bylo zjištěno, že množství nestrukturálních sacharidů s nadmořskou výškou stoupá, v protikladu k teorii Sveinbjörnssona (2000). Pozitivní uhlíková bilance na HHL je vysvětlována malou ztrátou uhlíku respirací během období vegetačního klidu a schopností stromů pokrývat tyto ztráty intenzivní asimilací během 2 - 3 dní s teplotou vyšší než 6°C (Hoch et al. 2002). Čím nižší je teplota, tím více nestavebních asimilátů se akumuluje v pletivech. Po zvýšení teploty se tyto asimiláty začínají spotřebovávat, což ukazuje na pokles množství nestrukturálních sacharidů v pletivech s rostoucí teplotou (viz obrázek 3, Körner 2003).

Obrázek 3: Obsah nestrukturálních sacharidů v listech a větvích dle průměrných teplot vegetačního období v různých klimatických pásmech (dle Körner 2003, s. 14)



Zvyšování koncentrace CO₂ v atmosféře v poslední době pravděpodobně vykazuje mírně pozitivní vliv na narůst HHL (Dullinger et al. 2004). Zvyšuje se intenzita fotosyntézy a množství nestrukturálních sacharidů akumulovaných v listech a větvích. Přestože je uhlíku v pletivech dost, zřejmě však již nemůže být zabudován do tvorby nových pletiv, což je i limitem růstu (Hättenschwiler et al. 2002, Hoch et al. 2002, Sveinbjörnsson et al. 2010).

3.3 Teorie omezené reprodukce

Hypotéza omezené reprodukce se zakládá na neúspěšné reprodukci dřevin na hranici lesa a neschopnosti ujmouti se semenáčků. Vývoj semen, jejich klíčení a rozptyl je omezený teplotou, mikrorelieфом a mikroklimatem (Richardson, Friedland 2009).

Existují tři hlavní strategie, které používají rostliny pro obnovu svých populací v extrémních a nestabilních klimatických podmínkách vysokohorských oblasti (Körner 1999):

- 1) produkce a rozptyl semen – pohlavní reprodukce;
- 2) tvorba vegetativních propagulí – klonální reprodukce;
- 3) strategie udržování obydleného prostoru po co nejdelší dobu (dlouhověkost).

Z dlouhodobého hlediska, poloha HHL závisí nejen na schopnosti odolávat drsným klimatickým podmínkám, ale i na schopnosti reprodukce: buď generativní, nebo

vegetativní. Regenerace ze semene na HHL zůstává vzácným jevem, i když v nižších polohách ekotonu je rozšířena poměrně hojně (Smith et al. 2003).

Produkce životaschopných semen v hlavní míře závisí na okolní teplotě, a proto je silně citlivá ke klimatickým změnám. Čím větší je teplota, tím intenzivnější je klíčení (Körner 1999).

V ekotonu horní hranice lesa se cykly tvorby semen opakují v intervalech od 9 do 11 let, při optimálním intervalu 3 – 5 let (tzv. semenné roky u jehličnanů). Navíc, podíl životaschopných semen je velmi malý (Holtmeier 2009 a Wieser, Tausz 1997).

Vyklíčení a ujmoutí se semena vyžaduje velmi příznivé mikroklimatické podmínky: menší vliv větru a přímých slunečních paprsků, existenci sněhové pokrývky atd. Příznivé může být například brzké odtání sněhu na osluněné straně stromové skupinky nebo přítomnost polštářovité vegetace (Holtmeier 2009 a Wieser, Tausz 1997). Sousedící vegetace tvoří přirozenou ochranu, která snižuje rozpětí denních a nočních teplot na povrchu listů. Vyšší noční teploty spolu s menším denním ozářením snižují foto-inhibici a nižší denní teploty snižují riziko vodního stresu. Oba faktory vedou k lepší bilanci uhlíku a zvětšují šance semenáčku na přežití (Smith et al. 2003). Na druhou stranu, sousední vegetace stíní semenáčky a brání v přenosu tepla. Větší akumulace sněhu na závětrných svazích zkracují délku vegetačního období a zvyšují riziko onemocnění houbovými chorobami (Holtmeier, Broll 1992).

Přežívání semenáčeků v rámci ekotonu HHL je často limitováno vysycháním, nízkou asimilací uhlíku a malým množstvím živin v důsledku nevyvinutého kořenového systému a málo vyvinutými mykorhizami (Smith et al. 2003).

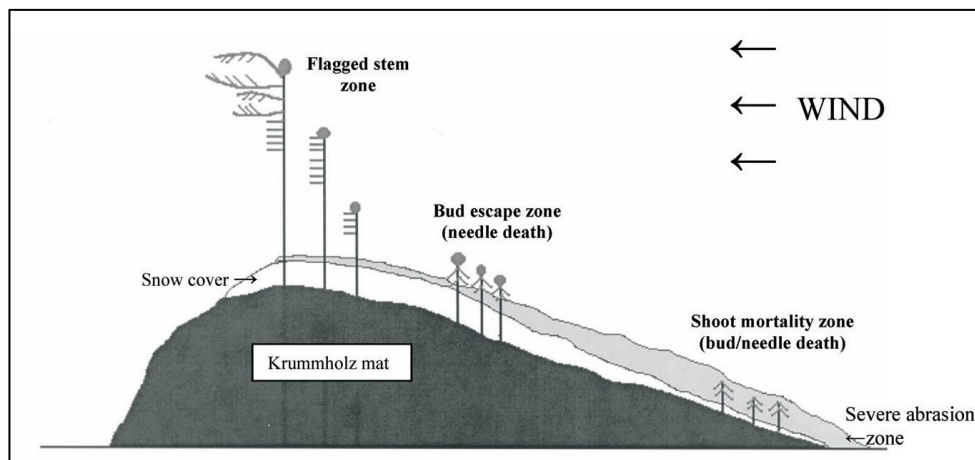
V případě přežití semenáčku (kritické jsou zejména první dva roky po uchycení) je dále jeho růst nepříznivě ovlivňován zejména abrazí ledovými krystaly (Tranquillini 1979). Ta poškozují kutikulu jehlic, větve a pupeny a nedává stromům možnost vytvořit vzpřímený kmen a dosáhnout normálních výšek.

V podmínkách snížené rychlosti větru, na závětrné straně stromů však mohou noví jedinci růst vertikálně (Körner 1999). Takové vzájemné pozitivní ovlivňování dovoluje etablování nových stromů (Smith et al. 2003, viz obrázek 4).

Výše uvedené pozitivní zpětné vazby vedou ke vzniku větších stromových skupinek, často s vlajkovými formami stromů. Čím větší počet semenáčeků a stromů přežívá, tím větší úkryt se tvoří pro další stromy, tím pádem se postupně zvětšují lesní plošky, což může vést k vzestupu HHL (Smith et al. 2003).

V případě dalšího oteplování lze v ekotonu HHL očekávat rozšíření generativní reprodukce. Nutně to však nemusí znamenat úspěšné přežívání semenáčeků, protože zvyšující se teplota (a tím i výpar) musí být kompenzována větším množstvím srážek a větší půdní vlhkostí (Holtmeier 2009). Důležitým faktorem z hlediska generativního rozmnožování je i věk stromů, protože mladé porosty produkují větší množství životaschopných semen než stromy staré (Körner 1999).

Obrázek 4: Schematická ukázka stanoviště proměnlivého růstu dřevin v klečové i ve vzpřímené formě (Smith et al. 2003)



Dřeviny, které se mohou obnovovat i vegetativně (tj. klonálně – formováním ramet nebo-li výmladků) jsou na hranici lesa zvýhodněné oproti těm, které se rozmnožují jen generativně (Körner 1999). Protože vegetativní rozmnožování není až tak závislé na příznivých podmínkách, může pokračovat i při nízkých teplotách. Kromě toho, klonální skupiny slouží, jako skladiště živin, což je v drsných podmínkách na HHL významnou výhodou (Smith et al. 2003).

Vegetativní rozmnožování je většinou charakteristické pro listnáče, ale často se vyskytuje i u jehličnanů, například rody *Abies*, *Juniperus*, *Tsuga* a *Picea*. U většiny druhů rodu *Pinus* je vegetativní rozmnožování výjimkou (Smith et al. 2003).

Klonální reprodukce většinou nastává v podmínkách růstu stromů na strmých svazích, kdy po lavinách nebo sesuvech dochází k lámání stromů nebo jejich přitlačení k zemi a následnému zakořenění větví (Holtmeier 2009). Přitlačení může být dáno i velkými akumulacemi sněhu. Vegetativní reprodukce je vzácná v nízkých nadmořských výškách, avšak s přibližováním se k HHL její pravděpodobnost stoupá (Holtmeier 2009).

Stromy, regenerující jen ze semene, umírají po dosažení svého maximálního věku. Klonální skupiny naopak mohou existovat v podstatě po neomezenou dobu, pokud nejsou poškozené požárem, hmyzem, infekcemi a zhoršováním klimatických podmínek (Holtmeier 2009).

Teorie omezené reprodukce tedy může být uplatňovaná jen tam, kde je pro HHL charakteristické krátké vegetační období a drsné klimatické podmínky se silnými větry, lavinami a velkou různorodostí mikroklimatu, ovlivňujícími přežití a růst semenáčků (Holtmeier 2009). Klima tropických HHL je stabilnější a příznivější pro reprodukci stromů, což tedy vylučuje globální platnost této hypotézy (Holtmeier 2009).

3.4. Vliv modulativních faktorů na formování horní hranice lesa

Poloha HHL je kromě globálních faktorů (teploty vegetačního období) ovlivňovaná lokálním mikroklimatem, mikroreliéfem a mezoreliéfem, antropogenní činnosti (Schickoff 2005). Samy o sobě tyto faktory nemohou determinovat polohu HHL, ale vysvětlují její odchylky od obecného trendu (Schickoff 2005).

Například návětrné hřbety dostávají skoro dvakrát více srážek, mají větší oblačnost a jsou pod vlivem silnějších větrů, což vede k poklesu HHL (vliv delšího období se sněhovou pokrývkou, nižší suma teplot; Shickoff 2005). Méně vlhké, více osvětlené a méně ovlivněné srážkovou činností jsou centrální hřbety. Mají celkově vyšší teploty vegetačního období a HHL se zde nachází výše. Tento fenomén se nazývá „Massenerhebungseffect“ (efekt hmotnatosti pohoří, Körner 1999). Tento jev například ovlivňuje výskyt stromů ve Východním Tibetu v aridním klimatu až ve výškách 5000 m (Körner 1999).

Velké akumulace sněhu a s tím související nízké půdní teploty potlačují výměnu plynu v pupenech a vývoj nadzemních vegetativních orgánů, což značně omezuje jak růst, tak schopnost rozmnožování (Körner 1999).

V rovníkových oblastech jsou dvěma podstatnými faktory ovlivňujícími polohu HHL velká oblačnost a denní periodicita promrzání a rozmrzání půdy (Körner 1999).

Modulativní faktory můžeme rozdělit do dvou skupin (Körner 1999):

- 1) faktory vedoucí ke klimatickému stresu: **opakované poškození mrazem** (na podzim nebo na počátku jara, pletiva mohou být poškozena teplotami od -10°C do -6°C , když ještě nejsou dostatečně „vytvrzená“ - týká se zejména kutikuly jehličnanů), **zimní vysychání**: (poškození listů a větví vlivem jejich vyšší teploty indukující vyšší transpirační tok, avšak voda je v půdě zmrzlá, což fyziologická suchost) (Hadley and Smith 1990); zamrzlý kmen vyvolává kavitaci xylému, což vede k omezenému pohybu vody během teplé periody a vzniku hnědých skvrn na listech;
- 2) disturbance (mechanické poškození větrem, sněhem, ledem, lavinami, herbivory nebo houbovými patogeny vede k odstraňování většího množství biomasy, než může být vyprodukováno);

Podle Tranquillini (1979) jsou nízké teploty hlavní příčinou výskytu zakrslých stromových forem na HHL, protože způsobují nedostatečnou zralost kutikuly a ta pak snáze podléhá následné abrazi sněhem a ledem (Holtmeier 2009). Krátké vegetační období vede k nedokončenému vývoji epikutikulárního vosku a ligninu. Nadměrné vysychání listů s nedozrálou kutikulou pak vede k jejich poškození či ztrátě (Richardson, Friedland 2009).

V tropech se mrazy na hranici lesa vyskytují během jasných nocí v průběhu celého roku. Radiační ochlazení je pravděpodobně menší v korunách stromů s úzkými listy (které mají dobré podmínky pro konvektivní spojení s atmosférou) (Körner 1999).

Zimní vysychání není charakteristické pro celou HHL v mírném pásu, nelze jej pozorovat u *Pinus sylvestris*, *Pinus banksiana*, *Abies balsamea*, *Picea mariana* a *Nothofagus solandri*. Možnou adaptací na zimní vysychání je opadavost, často se vyskytující na severní polokouli (Körner 1999).

Stromy na HHL jsou schopné snášet extrémní minimální teploty, na rozdíl od stromů nižších poloh:

- Xylém u druhů *Salix* spp. a *Betula utilis* může snášet teploty až -50°C až -70°C ;
- Kůra, listy a xylém druhů *Rhododendron campanulatum*, *Juniperus recurva*, *Sorbus* a *Pinus wallichiana* přečkají i teploty -25°C až -35°C ;
- Kůra, listy a xylém druhů *Abies spectabilis* a *larix potanini* snáší teploty -20°C až -25°C .

Důležitou roli v ochraně porostů proti nízkým teplotám hraje sněhová pokrývka zmenšující zimní extrémy a zvyšující šance stromů na přežití. Na druhou stranu, stromy pod sněhovou pokrývkou ztrácí odolnost k mrazům a mohou být poškozovány nízkými teplotami po roztání sněhu (Tranquillini 1979). Navíc větší vlhkost vzduchu spolu s konstantními teplotami okolo 0°C pod sněhovou pokrývkou zeslabuje resistenci stromů vůči parazitickým sněžným houbám rodu *Heripitrichia* spp. and *Phacidium* spp. (Wieser, Tausz 2007).

Mechanické poškození větrem, ledem, sněhem a lavinami má vliv na mechanickou strukturu stromů a jich fyziologické procesy. Vítr ovlivňuje evapotranspiraci a vyfouká ochrannou sněhovou pokrývku. Silný studený vítr podporuje zimní vysychání a zesiluje záporné teploty na otevřených místech, vede k lámání větví a větviček a formování vlajkové formy korun stromů v závislosti na jeho směru (Wieser, Tausz 2007). Nicméně samotný vliv větru na poškození kutikuly u jehličnanů prokázán nebyl (Wieser, Tausz 2007).

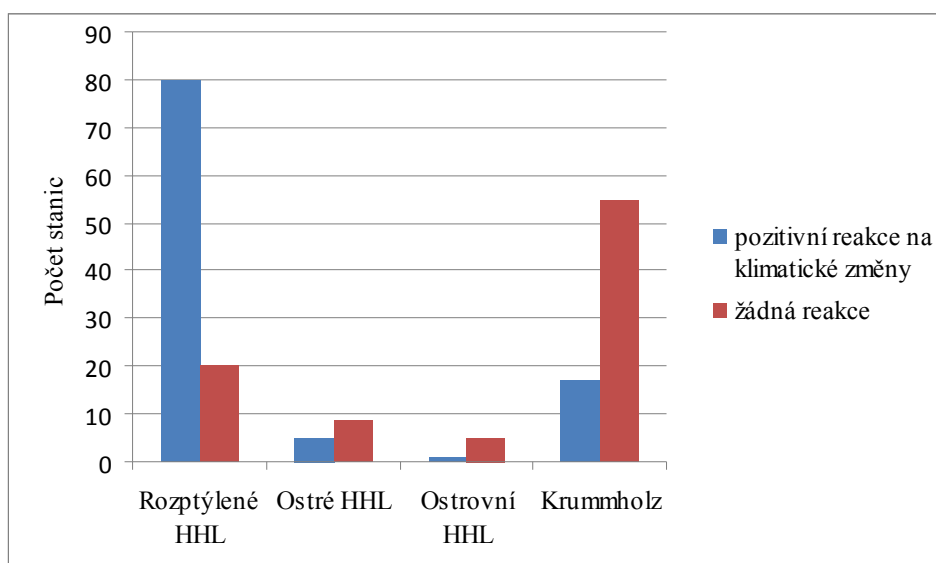
4 Klasifikace horní hranice lesa podle tvaru přechodové zóny

Harsh a Bader (2011) podle tvaru rozdělují ekoton HHL na čtyři skupiny:

- rozptýlený: postupný pokles výšky stromů a jejich hustoty podél ekotonu;
- ostrý: výška a hustota stromů se náhle mění, zapojený les se stromy nad 3 m přímo sousedí s nízkou alpínskou vegetací;
- ostrovní: lesní ostrůvky nad hranicí zapojeného lesa;
- přechod do kleče (krummholz): zakrslé a poléhavé dřeviny s velkým množstvím větví, tvořené v důsledku různých stresových událostí.

Tvar HHL se lehce pozná v terénu a je důležitým indikátorem její dynamiky. Až 80 % rozptýlených HHL reaguje svojí expanzí na současné oteplování klimatu. Mezi ostrými a ostrovními HHL naopak jen 25 % vykazuje změny ve své poloze kvůli zvyšování teplot (viz obrázek 5).

Obrázek 5: Reakce různých tvarů horní hranice lesa na klimatické změny od roku 1900 (Harsh a Bader 2011)



Rozptýlené HHL jsou nejrozšířenější a nejvíce prozkoumané (Harsch a Bader 2011). Hlavní příčinou formování tohoto typu HHL jsou nízké teploty vegetačního období. Mezi další příčiny patří slabé generativní zmlazování a vysoká úmrtnost stromů, ovlivňující snižování hustoty porostů. Tento typ je charakteristický nízkým výskytem klečových růstových forem. Velký negativní vliv mají kompetiční efekty. Například HHL v suchých oblastech jsou charakterizovány velkými vzdálenostmi mezi stromy kvůli konkurenci mezi kořeny (*Pinus hartwegi* v Mexiku, *Polylepis tarapacana* v Bolívii, Harsh a Bader 2011).

Rozptýlené HHL rychle reagují na klimatické změny (o 20 let rychleji než ostré HHL a o 40 let rychleji než ostrovní HHL, Harsch a Bader 2011). Zvyšování teplot vede k nárůstu hustoty porostů a zvýšení přežívání semenáčků (viz obrázek 5). Kromě toho je pozitivní reakce na oteplování spojená i s rostoucí průměrnou roční teplotou. V druhovém složení často převládají jehličnany.

Ostré HHL se obyčejně vyskytují níže, než probíhá klimatická HHL (Harsh a Bader 2011). Hlavní příčinou vzniku tohoto typu HHL jsou disturbance a stresové klimatické události. Tyto HHL nejsou podmíněny faktory limitujícími růst („growth limitation“), což potvrzuje výška stromů přesahující 3 m, velké množství životaschopných semen a rychlý růst stromů. Velkou roli zde hraje kompetice a naopak zpětnovazební pozitivní efekty (např. přežívání semenáčků v poloze za stromovou skupinou). Úmrtnost semenáčků je silně ovlivněná i výskytem permafrostu. Nepříznivé a stresové podmínky pro přežití semen pod klimatickou HHL vysvětlují nižší polohy ostré HHL v porovnání s rozptýlenou. V druhovém složení převládají listnáče, často stálezelené (*Eucalyptus pauciflora*, *Nothofagus* spp.), neboť jsou citlivé k mrazům a silně závisí na kompetici. Kompetiční efekt často vede k zvětšování ostrosti vzhledu HHL (Harsh a Bader 2011).

Ostrovní HHL se vyznačují přítomností malých ostrůvků vzpřímených stromů nebo kleče nad klimatickou HHL (Harsh a Bader 2011). Nejvíce jsou rozšířeny v Severní Americe. Forma a velikost ostrůvků závisí na topografii, úhynu semenáčků a stromů. Tento typ HHL se začíná tvořit tam, kde topografické podmínky vytváří příznivé mikroklima pro růst stromů. Avšak, výskyt negativních faktorů (například přemísťování sněhu, vítr) v blízkosti ostrůvků, překáží tvorbě zapojeného lesa. Ostrůvky tvořené vzpřímenými stromy mají lepší bioklimatické podmínky. V druhovém složení převládají jehličnany, což může být pravděpodobně vysvětlováno geografickou polohou tohoto typu HHL (většina HHL v Severní Americe je tvořena jehličnany). Pozitivní zpětná vazba mezi produkcí a ujmoutím semenáčků může vést jen ke stabilizaci ostrovních HHL, nikoliv ke zvyšování celkové HHL, která může nastat jen v případě zlepšování klimatických podmínek limitujících přežití (Harsh a Bader 2011).

Hranice lesa tvořená klečovými růstovými formami dřevin se skládá z porostů nedosahujících 3 m a někdy ani 2 m. Jedná se o zvláštní typ HHL, který může mít jak rozptýlený nebo ostrý, tak i ostrovní tvar (Harsch a Bader 2011). Klečové formy dřevin se vyskytují v pohořích celého světa zejména na svazích vystavených větru. Kleč je adaptivní formou dřevin na drsné klimatické podmínky. Často se jedná o výsledek fyzického poškození stromů a limitované schopnosti růst. Charakteristické je vegetativní rozmnožování. Generativní rozmnožování se téměř nevyskytuje kvůli malému přežívání semen. U některých klečových hranic je aktuálně pozorováno zvýšené přežívání semenáčků, které je výsledkem zlepšujících se zimních podmínek,

nicméně letní podmínky zůstávají stejné, což překáží přechodu k ležce v jiný typ HHL (Harsh a Bader 2011).

Velká rozmanitost klimatických a orografických podmínek v rámci jednoho pohoří tak může podmínit výskyt různých forem HHL i na malém území. Například ve španělských Pyrenejích se na svazích s různou expozicí lze setkat s ostrou (vliv větru) a rozptýlenou (vliv nízkých teplot) HHL (Harsch a Bader 2011).

5 Přehled teplotních indikátorů polohy horní hranice lesa

Jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, teploty vzduchu či půdy jsou důležitým faktorem, ovlivňujícím růst stromů. Podnebí obecně určuje strukturu porostů, druhové složení, množství biomasy a podmínky pro přežití stromů (Tranquillini 1979).

Stromy na HHL jsou vystaveny chladnějšímu klimatu v porovnání s keříčkovitou vegetací, což je způsobeno jejich aerodynamickými vlastnostmi (svázáním s volnou atmosférou) (Körner 2003).

Obecně, teplota listů, apikálních meristémů a nadzemního kambia víceméně odpovídá dennímu kolísání teploty vzduchu. Nicméně, sezónní a denní amplitudy pletiv jsou často nižší v dolních částech koruny, což je způsobeno stínem a dopadem menšího množství přímých slunečních paprsků. Stejný vliv mají husté koruny na teplotní charakteristiky půdy, která má nižší amplitudy teplot během zimy a vegetačního období než okolní atmosféra (Wieser 2002).

U jehličnanů na HHL se průměrná teplota na povrchu listů málokdy liší více, než o 0 – 4 K oproti nižším polohám. V závislosti na uspořádání větví a rychlosti větru, mohou být listy v horní části stromu při úplném osvětlení vystaveny teplotám až o 21 K vyšším než je teplota okolního vzduchu. Za nočního ochlazování, naopak, teplota listů (jehlic) klesá a může být až o 9,3 K nižší než teplota vzduchu (Körner 1999).

Důležitým faktorem je půdní teplota, a to z následujících důvodů (Körner, Paulsen 2004):

- a) kořeny jsou velmi citlivé ke změně teploty;
- b) teplota měřená v hloubce 10 cm pod zapojeným lesem se blíží průměrné denní teplotě v úrovni korun stromů;
- c) mechanismus fyziologického růstu začínající při určité teplotě působí na buněčné úrovni a je stejný ve všech pletivech (tedy i v kořenech);
- d) teplota kořenů přímo ovlivňuje nadzemní metabolismus.

Problémem je snaha porovnávat půdní teploty v různých oblastech, protože teplota půdy je závislá na velkém množství faktorů: textuře, vlhkosti, tepelné vodivosti, typu vegetačního pokryvu atd. (Holtmeier 2009).

Podle Körnera se průměrná teplota půdy v maximálních polohách HHL během vegetační periody rovná 5,4°C – 7,8°C (Körner, Paulsen 2004). Maximální hodnota na HHL pod lesními porosty nikdy nepřevyší 15°C. Minimální extrémy v centrální Asii se rovnají -5° až -10°C. Minimální půdní teplota dostatečná pro růst stromů se rovná 3,2°C. (Körner, Paulsen 2004) Avšak růst kořenů, a s tím i absorpční schopnosti kořenů jsou značně omezené již při teplotě nižší než 6°C (Alvarez-Uria, Körner 2007).

Důležitou roli hraje mocnost sněhové pokrývky, která brání zamrznutí půdy a poklesu její teploty pod 0°C (Wieser 1997).

Výzkum různých teplotních poměrů na HHL je zajímavý především tím, že dovoluje najít vhodné teplotní indikátory pro určování minimálních teplot podmiňujících přechod od lesních porostů k alpínskému bezlesí. V literatuře jsou uváděny následující teplotní indikátory polohy horní hranice lesa: průměrná teplota čtyř nejteplejších měsíců (Wardle 1998), průměrná teplota měsíců jejichž průměrná teplota je vyšší než 5°C (Körner 1998), průměrná teplota dnů jejichž denní průměrná teplota převyšuje 5°C (Tremml 2009), průměrná teplota periody s teplotami vzduchu vyššími než 0°C (Körner, Paulsen 2004), průměrná denní teplota periody začínající prvním dnem s teplotou vyšší než 5°C a končící posledním dnem s teplotou vyšší než 0°C (Tremml 2009), suma denních teplot větších než 5°C (Holtmeier 2003), minimální počet dnů s teplotou potřebnou pro růst stromů, 100 dnů s $T_{\min} > 6,5^{\circ}\text{C}$. Teplota 5°C je přibližným minimem, vhodným pro fyziologickou aktivitu dostatečnou pro růst stromů (Körner 2007).

Při použití teplotních indikátorů je podstatné chápat, že v přírodě fakticky neexistuje „průměrná teplota“ (Holtmeier 2009). Tento faktor lze používat jen ve vztahu ke globální HHL jako společný indikátor její pozice.

Körner (1999) na základě svého výzkumu teplot naměřených za celé vegetační období došel k závěru, že minimální teplota potřebná pro dělení buněk a tvorbu funkčních pletiv kolísá v rozmezí od 3°C – 10°C a je přibližně stejná v různých zeměpisných šířkách. Podle Köpenova pravidla je hranice lesa limitovaná izotermou 10°C (Alden et al. 1993). Průměrná teplota vegetačního období na HHL v různých částech světa se rovná 6° – 7°C (Schickoff 2005) nebo 5,5°C (půdy) – 7,5°C (ovzduší) (Körner 1999). Wineger (1981) na základě studia tropických lesů tuto hranici zvyšuje na 8-9°C (kvůli vlivům odlesnění). Malyshev (1993) ve své práci uvádí, že teploty 0 – 5°C jsou efektivnější při kontrole polohy HHL než teploty 10°C. Průměrná teplota vegetačního období v horách Vysoké Asie dosahuje 8,2°C (Schickoff 1993), což více méně koreluje s výše uvedenými hodnotami.

Délka vegetačního období pravděpodobně nehraje tak významnou roli, protože se značně liší v různých zeměpisných šířkách: od 3 měsíců v subarktické oblasti do celého roku v rovníkovém pásu (Körner, Paulsen 2004).

V tropických zeměpisných šířkách, kde průměrná teplota vegetačního období dosahuje 8°C – 11°C a je dostatek vláhy a živin, je dynamika HHL spíše závislá na schopnosti semenáčků přežít nepříznivé podmínky než na vlivu teploty na strukturální růst stromů (Körner 1999).

V souvislosti s teplotními indikátory je obtížné vysvětlit polohu lesních ostrůvků ležících vysoko nad vlastní horní hranicí zapojeného lesa (Körner 1999). Lze se s nimi setkat všude ve světě i při teplotě vegetačního období 2,5 - 5°C. Miede (1994) ve své

prací uvádí výskyt 3,5 m vysokého *Juniperus recurva* na svazích Everestu ve výšce 4420 m, tedy o několik stovek metrů výše nad horní hranicí zapojeného lesa v Centrálních Himálajích. Jehličnaté lesy ve východním Tibetu dosahují nadmořských výšek až 4600 m (Oshawa 1990).

Existují dvě možné teorie, vysvětlující tento jev (Körner 1999):

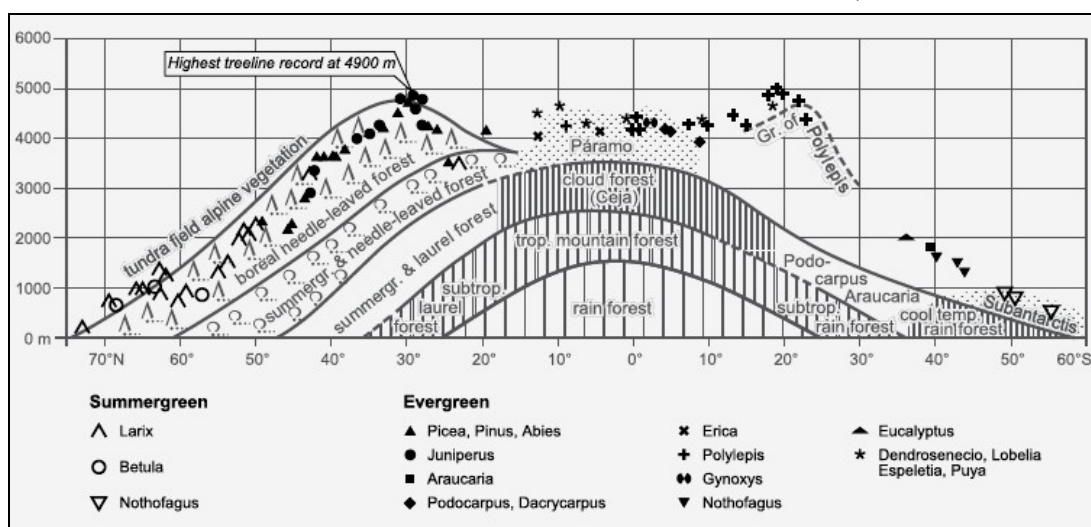
- a) ostrovní lesy jsou reliktem příznivějších klimatických podmínek (kvůli specifickému vnitřnímu mikroklimatu mohou ustát extrémní podmínky a odolávat negativním klimatickým oscilacím);
- b) stromové plošky představují zbytek lesních porostů, které byly odstraněny antropogenní činností (což v tomto případě ukazuje na pokles původní přirozené hranice lesa).

Teorie reliktních plošek však může být aplikována pouze na skupiny stromů, nikoliv na ojedinělý strom (Körner 1999). V případě, že lesní ostrůvky opravdu charakterizují polohu skutečné přírodní klimatické hranice, kritická teplota vegetačního období pro existenci tropické a subtropické HHL se rovná 2,5 – 5°C, což je méně než pro stejné lesy ve vyšších zeměpisných šířkách, kde se tato teplota pohybuje v rozmezí 5,5 – 6°C (Körner 1999).

6 Obecný přehled druhového složení horní hranice lesa v různých klimatických oblastech

Na obou polokoulích se poloha HHL zvyšuje směrem od vysokých k nízkým nadmořským výškám. Nicméně, svých maximálních nadmořských výšek dosahuje nikoli v rovníkových šířkách ale v tropických a subtropických aridních pohořích (viz obrázek 6). Například v Andách (západní Bolívie) porosty *Polylepis tomentella* dosahují výšek 5000 m n. m. Nejvyšší polohy HHL jsou charakteristické pro Tibet (Troll 1973).

Obrázek 6: Distribuce hlavních zonobiomů a orobiomů na Zemi (Miehe 2007, s. 189)



Dále se zaměříme na popis druhového složení horní hranice lesa ve studované oblasti. Ta zasahuje do pásem vlhkého mírného pásu severní polokoule, vlhkých tropických a subtropických oblastí a aridních oblastí.

Vlhký mírný pás severní polokoule

V této oblasti polohu HHL určují především teplotní charakteristiky (chladné léto, nízká teplota nejteplejšího měsíce, délka vegetačního období atd.) limitující obecný růst stromů (Troll 1973). HHL se převážně skládá z jehličnanů. Můžeme se však setkat i s opadavými listnáči (Ohsawa 1990). Převládajícími druhy jsou *Pinus cembra*, *Pinus sibirica*, *Larix sibirica*, *Juniperus* spp., *Abies densa* atd. Fenoménem této klimatické oblasti jsou porosty *Betula pubescens*, *Betula tortuosa* a *Betula utilis*, vyskytující se na HHL nad porosty jehličnanů (Troll 1973).

Vlhké tropické a subtropické oblasti .

V této klimatické oblasti v horách Vysoké Asie převládají druhy rodu *Juniperus* a *Rhododendron*, tvořící typickou krajinu. Největších nadmořských výšek, 4720 m n. m.,

dosahuje *Juniperus tibetica* ve vlhkých oblastech jihovýchodního Tibetu. V sušších oblastech *Juniperus tibetica* je nahrazován *Juniperus indica*. Lze se zde často setkat s druhy *Abies spectabilis*, *Juniperus recurva*, *Abies densa*. Jediným druhem břízy, rostoucím v této oblasti a dosahujícím HHL je *Betula utilis*, vyskytující se v nadmořské výšce až 4200 m n. m (Miehe. Miehe 2000). V těchto zeměpisných šířkách mnoho jehličnanů a listnáčů mírných šířek dosahuje svých nejvyšších poloh (Oshawa 1990).

Aridní oblasti

Aridní oblasti v horách Vysoké Asie lze najít tam, kde se vyskytuje srážkový stín. Příkladem lze uvést východní Tibet a centrální Ťan-šan. V těchto lokalitách jsou stromy běžně rostoucí jehličnany (druhy rodu *Picea*, *Abies*, *Pinus*) jsou nahrazovány *Juniperus sabina*, *Juniperus squamata*, *Juniperus nana* atd. V severozápadních Himálajích *Juniperus turkistanica* a *Juniperus semiglobosa* jsou nahrazovány porosty *Betula utilis* (Troll 1973).

7 Fyzicko-geografická charakteristika studovaného regionu

Region Vysoké Asie zaujímá obrovskou plochu a rozprostírá se od subtropického do mírného klimatického pásu. Je charakterizován celou řadou rozmanitých klimatických podmínek a představuje různorodou mozaiku edafických, biotických a reliéfových faktorů. Základní horské systémy, ze kterých se skládá tento region, jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Základní údaje o studovaných pohořích (Černík, Sekyra 1969)

Pohoří	Nejvyšší bod	Nadmořská výška (m n.m.)	Výška sněžné čáry (m n. m.)	Výška horní hranice lesa (m n. m.)
Himálaj	Čhomolungma	8848	3600 - 4000	4500 - 6000
Pamír	Kongur I	7719	4300 - 5400	do 3000
Hindúkuš	Tirič-Mir	7706	4800 - 5000	3000 - 3500
Karakorám	Čogori (K2)	8611	3200 - 3600	4700 - 5900
Transhimálaj	Aling Gangri	7315	5500 - 6000	4000
Tibetská plošina	De Rinsovo	6802	5500-6000	3000 - 3500
Ťan-Šan	Pik Pobedy	7439	3200 - 4270	1500 - 2800
Kunlun	Ullugh Mustagh	7723	4800 - 5700	2400 - 3700

7.1 Himálaj

Geologická stavba a geomorfologie

Nejvyšší pohoří na světě, vzniklo vyvrásněním v jižní části geosynklinály Thetys v době třetihorní alpínské fáze. Je 2500 km dlouhé, na šířku měří 200 – 300 km. Nejvyšší vrcholy tohoto pohoří zahrnují např.: Čhomolungma (Mt. Everest) – 8848 m, Kangčhendzonga – 8585 m, Lhoce – 8501 m (Černík, Sekyra 1969).

Himálaj tvoří gigantickou skalní a ledovou hradbu oddělující Tibetskou vysočinu a vnitroasijské pouště od úrodných indických nížin. Na západě ohraničuje údolí řeky Indus a na východě údolí horního toku Brahmaputry (Černík, Sekyra 1969).

Hlavní hřeben Himálají doprovází na jihu i na severu několik paralelních pásů. Začíná na západě mohutným masivem Nangá Parbatu, 8125 m, a končí na východě v oblouku Brahmaputry neméně vzhlednějším vrcholem Namcha Barva, 7755 m (Černík, Sekyra 1969).

Na jih z údolí Gangy se táhne třetihorní pohoří Sivalik, složené s konglomerátů, pískovců a slínů, dosahující výše 1500 m. Pohoří je dodnes v tektonickém neklidu. Vrcholy Sivaliku jsou hustě porostlé vegetací. Obydlen je málo (Černík, Sekyra 1969).

Druhým pásem na jih je Mahábhárat. Táhne se celým Nepálem a tvoří jej ruly, svory a ojedinele i žula. Nepřesahuje výšku 3000 m (Černík, Sekyra 1969).

V oblasti masivu Dhaulágiri se z hlavního hřebene odpojuje boční větev zvaná Malý Himálaj. Dosahuje střední výšky 3500 m (Černík, Sekyra 1969).

Druhým bočním pasem oddělujícím se na sever v oblasti řek Alaknandi, Satladž a Karnali je Zaskar. Pohoří je dlouhé asi 1000 km a tvoří čínsko-indickou hranici. Paralelně s Garhválskými Himálajemi probíhá v Tibetu ještě další himálajské pásmo Ladak. Je to aridní pohoří nevýrazného charakteru (Černík, Sekyra 1969).

Převažujícími horninami jsou žuly a metamorfované horniny: krystalické břidlice, ruly, křemence a mramory (Šlégl et al. 2001).

Klima

Horstvo je situováno v subtropickém podnebném pásmu. Klimaticky tvoří Himálaj ostrý předěl mezi monzunovými oblastmi Indie a suchou centrální Asií (Černík, Sekyra 1969). Zimní suchý monzun probíhá od listopadu do února, kdy z oblastí vysokého tlaku nad Tibetskou vysočinou vanou přes Himálaj severní větry. Od počátku června do konce září je indický subkontinent pod vlivem JV proudění s vlhkým oceánským monzunem. Hřebeny Himálaje monzun zadržují a především na jižních svazích dochází k výrazným srážkám. Ve východním Himálaji činí průměrné roční srážky 4000 – 6000 mm (v některých oblastech až 12000 mm). Na západě jsou srážky nižší: 2000 – 3000 mm. Himálaj je také vystaven vzdušným proudům JZ a SZ směru, přičemž nejvyšší rychlosti dosahují větry v říjnu až v listopadu (150-180 km/h). V souvislosti s tímto prouděním se zde udržuje i mimo monzunové období mírná vysoká oblačnost (Černík, Sekyra 1969).

V mnoha oblastech vysokých masívů panuje pro Himálaj typické mikroklima. Sněžná čára na jižních svazích kolísá okolo 5000 m (Černík, Sekyra 1969).

Efekt kontinentality zvyšuje polohu izoterm, čímž také zvyšuje hranici možného výskytu alpské vegetace. V některých oblastech má větší vliv na HHL než „Massenerhebungseffekt“. Důkazem je poloha HHL ve výšce 8000 m n. m. na Nanga Parbatu (Černík, Sekyra 1969). Teplotní rozdělení Himálaje ukazuje tabulka 5.

Tabulka 5: Průměrné srpnové teploty v různých zónách Himálají (Šlégl et al. 2001)

Zóna	Nadmořská výška, m n. m.	Průměrná teplota, °C
Tropická	do 800	nad 35
Subtropická	pod 1200	30 -35
Mírně teplá	1200-1900	25-30
Mírná	1900-2500	20-25
Mírně chladná	2500-3800	15-20
Chladná	3800-5500	5-15
Velmi chladná	nad 5500	0 - -5

Vegetace

Himálajská vegetace patří k nejpozoruhodnějším na světě. Z tropického pásma oblastí teras se ve výškách 1500 – 3000 m zdvíhá patro hustě zalesněných himálajských předhůří, kde žije většina obyvatelstva. Rostou zde husté dubové, březové a jehličnaté lesy (*Picea morinda*, *Abies pindrow*, *Larix griffithi*, *Cedrus deodara*, *Pinus longifolia* atd.) (Černík, Sekyra 1969).

Na patro lesa navazuje zóna nejcharakterističtější himálajské vegetace rododendronů. Od velkých stromů 10-15 m vysokých, až po zakrslé keřovité formy, které v souvislých plochách končí zpravidla ve 3800 m, avšak jednotlivě vystupují až do 5000 m (*Rhododendron lepidotum*, *setosum*, *antopogon*, *barbatum*, *Juniperus* spp., *Pinus wallichiana*, *Cedrus deodera*, *Picea smithiana*, *Betula utilis* atd.) (Černík, Sekyra 1969, Schickoff 2005, Troll 1973).

Subalpínské a alpínské louky začínají ve výškách kolem 4000 m. Převládají čeledi *Compositae*, *Cyperaciae*, *Euphorbiaceae*, *Gramineae*, *Leguminosae*, *Orchideae* atd.) (Černík, Sekyra 1969).

Severní svahy jsou daleko pustší a nevlídnější. Jejich relativní výška je nižší, protože vystupují z vysoké tibetské náhorní planiny. Vegetace je značně chudší, protože do vegetačních páter nezasahuje monzun. Převládá zde suchá step, les je vzácný. Krajinu oživují pouze pruhy vegetace kolem vodních toků (jalovce, tamaryšky, vrby). Na pustých svazích rostou kozince (*Astragalus*), kavyly (*Stipa*), lipnice (*Poa*) atd (Černík, Sekyra 1969).

Vlhké alpínské křoviny a louky jsou jedinou rostlinnou formací, kterou nalezneme na celém úseku Himálaje (Černík, Sekyra 1969).

7.2 Hindúkuš (Hindu-kush)

Geologická stavba a geomorfologie.

Jde o jedno z nejvyšších pohoří na světě. Rozbíhá se vějířovitě z Pamíru na JZ. Má vrásně zlomový charakter, náleží do alpsko-himálajského mladého velehorského systému. Na délku dosahuje asi 900 km a na šířku 200 – 400 km (Černík, Sekyra 1969).

Nejvyššími vrcholy jsou Tirič Mir, 7706 m, Nošak, 7398 m, Istor-o-Nal, 7398 m (Černík, Sekyra 1969).

Hindúkuš je složité vrásně-zlomové pohoří, které vybíhá z pamírského uzlu a táhne se v několika proudech afghánským vnitrozemím. Od hlavního hřebene vybíhá splet' bočních hřbetů, hřebenů a rozsoch dosahujících často délek několika set kilometrů. Často tvoří samostatné horské systémy (Černík, Sekyra 1969).

Geologicky patří Hindúkuš k alpínsko-himálajské vrásně zóně, jež spojuje vrásně struktury horstev Přední Asie s vrásnými strukturami pamírskými a

himálajskými. I když ve vrásné stavbě převládají třetihorní tektonické prvky, lze zde sledovat i zbytky po starých vrásných zónách z doby prahorní (Černík, Sekyra 1969).

Nejvyšší části pohoří obsahují hlavně ruly a břidlice, jimiž místy pronikají žuly a diabasy. Suché velehorské podnebí způsobuje silné zvětrávání. Proto na úpatí lze pozorovat rozsáhlá suťoviště, místy kamenná moře. V severní části pohoří se nacházejí světlé metamorfované břidlice a vápence. V podhůří jsou tu 600-160 miliónu let staré paleolitické a mezolitické vápence (Šlégl et al. 2001).

Těží se například tyrkysy, lazurit, rubín a železná ruda (Šlégl et al. 2001).

Klima

Podnebí se zde vyznačuje velkými denními a nočními výkyvy teplot. Léto je v horských oblastech chladné, se stálým počasím, zima je drsná. Nad 2500 m se udržuje sníh po 6-7 měsících v roce. Charakteristické jsou časté silné větry. Hindúkušské klima je možno označit za přechodné. Leží mezi monzunovou Vysokou Asií a aridní severní částí pamírskou. Monzun se tu uplatňuje jen v malé míře. Množství srážek se tu pohybuje od 500-1000 mm, v severní části klesá na 300 – 800 mm. Nejvlhčí podnebí panuje ve výškách 5500 m, kde již prakticky neexistuje srážkový stín. Monzun přichází v polovině července a v lednu a trvá přibližně dva měsíce. Nejvíce srážek zde spadne v srpnu. Patří k nejteplejším pohořím. Průměrná roční teplota se pohybuje kolem 10°C. Mrazy se celoročně vyskytují teprve nad hranicí 3000 m. Ledovce stékají až do 3000 m (Černík, Sekyra 1969).

Vegetace

Vegetace je chudá. Souvislejší lesnaté porosty pokrývají pouze některá jižní úbočí Východního Hindúkuše (topol, vrby, olše, moruše) a Spingararu. Severní svahy mají charakter polopouštní. Vegetace se vyskytuje ostrůvkovitě kolem vody (Černík, Sekyra 1969).

V keřovém patře lze najít hloh, kaliny, rybíz, tamaryšky, břízy, poduškovité jalovce arča (*Juniperus turkestanica*), jež převládají. HHL převážně tvoří druhy *Pinus wallichiana*, *Betula utilis*, *Abies pindrow*, *Picea smithiana*, *Larix griffithiana*, *Juniperus* spp. Subalpínský stupeň pokrývají stepní trávy. Nad 3800 m leží alpínské louky porostlé pestrou vegetací, v níž jsou hojně zastoupeny hořce, prvosenky, lomikameny, protěže, rozchodnice, máky alpského typu atd. Vegetace končí ve 4500 m. Nejvýše byl nalezen pryskyřník a to ve výšce 4800 m (Černík, Sekyra 1969, Schickoff 2005).

7.3 Pamír

Geologická stavba a geomorfologie

Pamír je nejvýznamnějším horským systémem Vysoké Asie a třetím nejvyšším pohořím světa. Zároveň se jedná o nejvýše položenou oblast na světě podle průměrné nadmořské výšky. Pohoří náleží do himálajské zóny. V severní části sousedí se staršími hercynskými a kaledonskými vrásnězlomovými orogény. Na délku měří zhruba 500 km, na šířku 400 km. Nejvyšší vrcholy tvoří: Kongur-tagh, 7719 m, Kongur-tebe-tagh, 7595 m, Mustagh Ata, 7546 m (Černík, Sekyra 1969).

Pamírská velehorská vrásná soustava je pokračováním alpínského vrásného pásma z oblasti severního Hindúkuše, které pokračuje směrem na východ do vrásných systémů Himálaje, Karakorumu a Kuen-lunu. Od staršího hercynského a kaledonského vrásného pásma (oblast ťan-šanská) je pamírský mladý systém oddělen tzv. Talasoferganskou tektonickou linií (Černík, Sekyra 1969).

Nejjednodušší dělení Pamíru je teritoriální: Východní a Západní Pamír, čínský Kašgarský Pamír a Afghánský Pamír (Černík, Sekyra 1969).

Východní Pamír je vysoko položená pustá náhorní rovina s širokými dolinami a kotlinami jimiž protékají meandrovité řeky. Dna údolí leží ve výškách 3700 – 4200 m, vrcholy hřbetů se pohybují mezi 5000 – 5800 m. Jsou málo zaledněné (Černík, Sekyra 1969).

Za hranici mezi Východním a Západním Pamírem se považuje poledníkový Zulumartskij hřbet. Nejcharakterističtější část Pamíru tvoří 240 km dlouhý Zaalajskij hřbet, probíhající od západu k východu nad rozsáhlou Alajskou velehorskou depresí, kterou protéká přítok Amudarji – Kyzylsu (Černík, Sekyra 1969).

Reliéf Západního Pamíru charakterizují hluboká, úzká údolí s divokými bystřinami. Hřebeny jsou divoce rozeklány, spadají z nich mohutné ledovce, vrcholy vybíhají z dolin až 4000 m vysoko. Vysoké hřebeny zachycují vláhu, a proto je zde klima vlhčí než ve Východním Pamíru (Černík, Sekyra 1969).

Kašharský hřeben tvoří monumentální ledovou bariéru oddělující Pamír od pouště Taklamakan. Zde leží nejvyšší pamírské vrcholy. V severní části jej protíná řeka Mundžisu, přítok Tarimu, a dělí hřeben na severní a jižní část. Horstvo má pouštní charakter s odpovídající vegetací a faunou a je bezlesé (Černík, Sekyra 1969).

Afghánský Pamír tvoří zhruba tři rovnoběžkové horské hřebeny, ležící nad kotlinou řeky Ab-i-Váchá, jednoho z pramenů Amudarji. Nejvyššího bodu dosahuje zaledněným vrcholem Sněžnaja glyba (6504 m). Sněžná čára se zde pohybuje okolo 5500 m (Černík, Sekyra 1969).

Pamír je seismický aktivní oblastí, pro kterou jsou charakteristické obrovské sesuvy a bahnotoky. Na území jihovýchodního svahu Ferganského hřbetu jsou sesuvy charakteristické pro 560 km² plochy (Merzlyakova 2002).

Klima

Velehorské oblasti Pamíru jsou pro vysokou ariditu a intenzivní větrnou činnost bezlesé (bezlesá step až poušť). Zvláště výrazné jsou difference mezi nočními a denními teplotami. Střední denní amplituda v pamírské velehorské stepi se blíží nejvyšší hodnotě na světě (střední průměry denních amplitud jsou i přes 15° C). V zimě převládají severovýchodní a východní, v létě severní a severozápadní větry. V podhůří vanou často padavé teplé fény rychlostí do 20 m/s (Černík, Sekyra 1969 a Merzlyakova 2002). V pamírské oblasti se projevuje zvláště typický teplý vítr zvaný afgánec, který dosahuje rychlosti až 15 km za sekundu (představuje pokračování jižního monzunu na sever). Teplotní inverze jsou ve velehorských údolích a pánvích častým jevem, což vede ke vzniku sněžných lavin (Černík, Sekyra 1969).

Pro velehorské oblasti jsou typické drsné zimy podobné zimám v arktických oblastech (Černík, Sekyra 1969). Na území přichází polární větrná masa, která se tvoří nad Sibiří a rovinami Kazachstánu (Merzlyakova 2002). Mrazy se často pohybují i okolo -50°C. Období bez mrazu je ve velehorské oblasti pamírské asi 50 dní, vegetační období zde trvá 138 dní, střední roční izoterma dosahuje hodnoty 0°C průměrně ve výšce 3250 m n. m. (pro srovnání v Alpách leží o 1500 m níže, ve východních Andách zhruba v téže výšce) (Černík, Sekyra 1969). V létě přichází tropické větrné masy přinášející horké a suché počasí (Merzlyakova 2002).

S rostoucí nadmořskou výškou se vzduch zvlhčuje, roste oblačnost a množství srážek. Maximum srážek je charakteristické pro březen až duben, kdy nad územím prochází iránská větev polární fronty. Ve východní části pohoří, která se nachází pod vlivem asijského monzunu, spadne největší množství srážek v létě, avšak tato oblast zůstává jednou z nejsušších na světě. Pro Západní Pamír je charakteristický úhrn srážek dosahující 300 – 600 mm. Obecně, nejvíce srážek je charakteristické pro pásmo mezi 2000 – 4000 m n. m (Merzlyakova 2002).

Výška sněžné čáry stoupá směrem k východu, ledovcová hmota závisí na kontinentalitě a ariditě. Nejvíce zaledněná pohoří leží proto v Západním Pamíru, a to ve skupině středního Transalaje a severní části hřebene Zulumart a hlavně pak v hřebenu Akademie, kde má sběrné oblasti Fedčenkův ledovec (Černík, Sekyra 1969).

Sněhová pokrývka zde leží od 2 do 6 měsíců. V podmínkách malých srážek a silných větrů je tenká a nerovná, což vyvolává hloubkové promrznutí půdy (Merzlyakova 2002).

Ve Východním Pamíru ve výškách 3800 m n. m. se lze často setkat s nespojitým permafrostem. Extrémní aridita klimatu a nízká vlhkost půdy zde determinuje výšku horní a spodní hranice distribuce permafrostu a posouvají ji o 500 – 800 m výše než ve vlhčích oblastech (horní hranice permafrostu zde leží o 500 m výš než v pohoří Qilan-

Šan, které se nachází ve stejných zeměpisných šířkách, ale dostává až 10 krát více srážek) (Merzlyakova 2002).

Rozsáhlé kryogenní formy reliéfu jsou vzácné a charakteristické jen pro vlhké oblasti. Kryogenní mikroformy, soliflukční terasy, polygony a pruhy o rozloze několika centimetrů vytváří charakteristický vzhled svahů (Merzlyakova 2002).

Dnešní ledovce jsou převážně typu alpského (údolní s karovými uzávěry). Na severních úbočích jsou též ledovce turkeštánského (lavinového) typu. Rychlost toku větších ledovcových splazů bývá i 175 m za rok při mocnosti až 550 m (Černík, Sekyra 1969).

V nitru Pamíru pramenní mohutný veletok Amudarja, v horách nazývaný Pjandž, který svým širokým údolím výrazně odděluje na J a na Z Pamír od Hindúkuše. Amudarja odevzdává své vody do Aralského jezera. Jižní hřebeny odvodňuje několika málo přítoky Indus a východní oblast, na západ od hřebene Sarykol, 2000 km dlouhá středoasijská řeka Tarim, ústící do jezera Lop-noor (Černík, Sekyra 1969).

Východní část hřebene Zulumart a severní výběžky Muzkolu odvodňuje velké vnitrozemské jezero Karakul řekami Karadžilda, Akdžilda a Muzkol (Černík, Sekyra 1969).

Vegetace

Na první pohled sice vypadá Východní Pamír bez života, přesto však botanici našli na 500 druhů rostlin. Nejčastěji se zde vyskytují poduškovitá společenství z čeledi trávníčkových, vlnice, kozinec, jež tvoří nízké husté porosty. Charakteristický je také polokeř bělostník pustinný, místně zvaný teresken. Z dřevin najdeme dále na chráněných místech ojedinělé zakrslé vrby a břízy (Černík, Sekyra 1969).

Na okraji pustinných východopamírských oblastí rostou *Carex pseudofetida*, *Cobresia capilliformis*, *Poa alpina*, do největších výšek v alpském stupni (často až do 5300 m) vystupují *Stipa orientalis*, *Stipa glareosa*, *Festuca sulcata* atd (Černík, Sekyra 1969).

V dolinách ve výškách 2500 – 2600 m převládají porosty pelyňků. Do 2300 m rostou například *Prangos pabularia*, *Ferula*, *Scbiosa songorica*, *Festuca sulcata*, *Stipa caucasica*. Ještě výše se nalézá charakteristická šanta, rdesno, kakost, pelyněk a několik druhů jalovců (*Juniperus semiglobosa*, *Juniperus seravshanica*, *Juniperus sibirica*). HHL je převážně tvořena *Pinus wallichiana*, *Betula utilis*, *Abies pindrow*, *Picea smithiana*, *Larix griffithiana*, *Juniperus excelsa*. Až do 4300 m můžeme nalézt *Arthropytum vakhanicum* (Černík, Sekyra 1969, Schickoff 2005).

Doliny otevřené na západ mají bohatý porost dřevin a poskytují podmínky pro zemědělství (v Šugnanu roste ječmen a luštěniny až do 3500 m, v Tádžikistánu se pěstují meruňky do 2700 m, v Darvazu a Rušanu se daří bavlně a vinné révě do 2000 m) (Černík, Sekyra 1969).

7.4 Karákoram

Geologická stavba a geomorfologie

Jedná se o druhé nejvyšší pohoří na světě s mohutným zaledněním. Geologická stavba se podobá Pamírské. V délce dosahuje asi 900 km, v šířce asi 100 km (Černík, Sekyra 1969). Nejvyšší vrcholy pohoří zastupují: Čhogori, 8611 m, Hidden Peak, 8068 m, Broad Peak, 8047 m. Sněžná čára 3200 – 3600 m, hranice lesů 4700 – 5900 m. Pohoří se dělí na Velký Karákoram (táhne se v délce 80 km), Malý Karákoram a Tibetský Karákoram (Černík, Sekyra 1969).

Geologicky představuje Karákoram pokračování pamírského systému. V centrálních hřebenech leží kontinentální terciérní uloženiny, které jsou nezvrásněné, ale tektonicky dislokované. Karákoram leží na zvrásněných křídových souvrstvích. Tektonicky vyzdvižený reliéf s mladou modelací ostře kontrastuje s tvary vnitřního Tibetu a Kuen-Lunu, tedy s územím, které bylo dlouho mimo dosah moří a kde od mezozoiku probíhá intenzivní, převážně mechanické zvětrávání v aridním kontinentálním klimatu. Na východě přechází alpský reliéf Karákoramu v náhorní vysočinu s méně výraznými hřbety. Zmlazení reliéfu pochází z doby neogenní a pleistocenní, kdy se měnila říční síť na základě četných výzdvihů (Černík, Sekyra 1969). Karákoram je zajímavý zejména glaciologicky, neboť se jedná o horstvo (nepočítáme-li polární oblasti), které je s 28 % zalednění své celkové plochy nejvíce zaledněným pohořím na světě (Šlégl et al. 2001).

Klima

Podnebí je poměrně suché, neboť do výše asi 5000 m zachycuje Himálaj monzunové větry. Teprve nad touto výškou spadá dostatek vláhy na úbočí hor. Teploty v zimě klesají pod bod mrazu, letní měsíce jsou však velmi teplé a ve výšce kolem 2000 m teploty dosahují i k 40°C. Suché a poměrně teplé podnebí zde vytvořilo zcela ojedinělý úkaz – vysokohorskou poušť, zejména v údolí poblíž Skardu. Nad hranicí 5000 m mizí srážkový stín a podnebí se stává vlhčím. Na některých místech zde spadne až 4000 mm srážek během roku. To přináší příznivé podmínky pro existenci ledovců (Černík, Sekyra 1969). Schickoff (2005) zdůrazňuje rozdíl doby tání sněhu na jižním a severním svahu hor Karákoramu, která se liší o 2 – 3 měsíce. S příchodem většího množství sluneční energie, ranního tání sněhu a vyšších teplot vzduchu a povrchu vegetativních orgánů rostlin, roste riziko fyziologického sucha. To nutí stromy vyvíjet adaptační mechanismy i k těmto suchům (Schickoff 2005).

Vegetace

Vegetační typ Karákoramu je polopustinný, převládají pelyňkové stepi. Přesto v některých částech Kašmíru a Ladaku pokrývají jižní svahy lesy, kde převažují

jehličnany smrk (*Picea morinda, smithiana*), jedle (*Abies pindrow*), borovice (*Pinus longifolia, wallichiana, gerardiana*), tis (*Taxus baccata* a cedr himálajský (*Cedrus deodara*). Les vystupuje do 3200-3500 m. HHL převážně tvoří *Juniperus turkestanica*, *Quercus semecarpifolia* a *Quercus incana*, *Pinus wallichiana*, *Salix karelinii*, *Betula utilis*, *Juniperus excelsa*, *Picea schrenkiana*. V keřovém stupni převládají břízy, rododendrony a jalovce (*Juniperus semiglobalis, communis*). Severní svahy pokrývá vegetace podobná vnitroasijským velehorám: bělostník, čimišník atd. Alpínské patro pokrývá na 600 druhů flóry alpského typu (Šlégl et al. 2001, Schickoff 2005).

7.5 Thien-Šan (Tjan-Šan)

Geologická stavba a geomorfologie

Thien-Šan je nejsevernějším horským systémem Vysoké Asie. Náleží k hercynské a kaledonské vrásné zóně a je mohutně zaledněný. Délka dosahuje zhruba 260 km, zatímco šířka ve střední části až 600 km. Na SV je oblast Tchien-šanu oddělená dolinou Ili od Džungarského Ala-tau, na jihozápadě se stýkají hřebeny Tchien-šanu s Alajem; hranicí je Ferganský hřeben (Černík, Sekyra 1969).

Systém Tchien-šanu se skládá z celé řady velmi rozlehlých horských hřebenů, které mají převážně rovnoběžkový průběh. Základem jsou hercynské tektonické jednotky vrásného a zlomového systému, ovlivněné tlaky starého tarimského masivu na jihovýchodě a tlaky mas Turanské pánve na severozápadě. Zpravidla je rozdělován na Západní, Centrální a Východní (Černík, Sekyra 1969).

Největším severním hřbetem západního Thien-Šane je Zajilijský Alatau. Tento masiv je silně zaledněn. Největších výšek dosahuje ve své střední části (Černík, Sekyra 1969). Průměrná nadmořská výška centrálních hřbetů dosahuje 3100 m n. m. Relativní převýšení je malé (Merzlyakova 2002).

Pro severní, centrální a jižní hřbety je charakteristická vysoká seismická a silná zemětřesení (Merzlyakova 2002).

Na severozápadě vybíhají ze Zailijského Alatau Ču-Ilijské hory. Na jihu nad jezerem Issyk-Kul se táhne oblouk Kungej Alatau. Nejvyšší hřebeny budují granitoidní horniny a proterozoické metamorfované zvrásněné série. Ve východní části převládají devonské a karbonové zvrásněné vápence a břidlice (Černík, Sekyra 1969).

Podloží některých oblastí tvoří vrstvy vápenců (Talasský Ala-Tau). Ve Východním Tjan-Šanu vystupují na povrch především krystalické břidlice, žuly, místy usazeniny, naopak vápence jsou vzácné (Černík, Sekyra 1969).

Denudované povrchy, nazývané v této oblasti „syrtý“, často tvoří vysoko položená údolí, pokrytá ledovci a aluviálními sedimenty (Merzlyakova 2002).

Klima

Podnebí odpovídá značné vzdálenosti této oblasti od oceánu. Zachycuje sice vláhu pocházející ze Severního ledového oceánu, ale jižní svahy trpí srážkovým stínem (prakticky celý jih pohoří sestupuje do pouští, z nichž největší je Taklamakan). Východní Ťan-Šan je mnohem sušší a je obklopen pouští i ze severu. Množství srážek roste se stoupající nadmořskou výškou (Černík, Sekyra 1969).

Teploty se značně liší, jak na denní, tak i na noční úrovni. V horských údolích se průměrné zimní teploty pohybují kolem -20°C , přičemž extrémních případech teploty klesají až k -50°C (Černík, Sekyra 1969). Mrazy jsou charakteristické během celého roku (Merzlyakova 2002).

Krátké vegetační období se mění od 6 měsíců ve výškách do 3000 m n. m. do 3 měsíců ve výškách 4000 m (Merzlyakova 2002).

Stejně, jako i na Pamíru, nad 3000 m se zde často vyskytuje permafrost (Merzlyakova 2002).

Časté jsou zde laviny, vyskytující na ploše do 400.000 km², přičemž na 280.000 km² jsou laviny pozorovány každý rok (Merzlyakova 2002).

Vegetace

Základnu západní poloviny pohoří tvoří suché asijské stepi a polopouště, východní polovina spadá přímo do pouští. Jen v korytech říček nalezneme na východě keře tamaryšků spolu s růžemi, vrbami a topoly (Černík, Sekyra 1969).

Výše, na severních vlhčích svazích nebo v dolinách, bývá dobře vyvinutá zóna lesů. Zprvu les smíšený se smrky, vrbami, břízou a jeřábem přechází ve výškách kolem 2000 m v řídké porosty jehličnanů, kterým kromě jedle (*Abies semenovii*) dominuje smrk t'ansanský (*Picea schrenkiana*). Vyrůstá tu spolu s jalovci (*Juniperus escelsa*, *pseudosabina*, *recurva*, *wallichiana*) několika druhů, které pokračují ve stále nižších bocháčcích až do výšek přes 3000 m, do zóny alpinských luk (Černík, Sekyra 1969).

V Džungarském Alatau se již objevují sibiřské druhy: jedle (*Abies sibirica*), *Malus sieversii* (Černík, Sekyra 1969).

7.6 Tibet

Geologická stavba a geomorfologie

System hor a náhorních rovin vnitřního Tibetu, nejvyššího území světa, zahrnuje pohoří Buku-mangi, Dupleix, Tanga, de Rinsovo, masiv Lcharikopo-Melong a náhorní rovinu Džangtang (Černík, Sekyra 1969). Na severu ohraničuje tibetské vnitrozemí Kuen-Lun, na západu Velký Karákoram se svými větvemi a na východě systém východotibetských okrajových pohoří. Tibetskou vysočinu tvoří série vesměs paralelních hřebenů rovnoběžkového směru. Mezi kuenlunským pohořím Arka-tagh a pohořím Dupleix leží

několik starých vyhaslých vulkánů, jako Ruisbruck, Reklju, Bjussi atd (Černík, Sekyra 1969).

Centrální část Tibetu náleží z větší části k mezozoické, jižní část potom k staroterciérní sedimentační pánvi Tethys. Geologické poměry zůstávají pro relativně malou zapracovanost území málo známé. Severní okrajová horská pásma náleží k hercynským vrásným jednotkám. Jižní Tibet spadá plně do zóny posteocenního himálajského vrásnění. Vyskytují se tu mladé žuly, diority a jiné horniny doprovázející alpinotvorné horotvorné pochody (Černík, Sekyra 1969).

V severozápadní a severovýchodní části Tibetu převládají vysoko položené náhorní plošiny, často bezodtokého charakteru. V úvalovitých depresích s četnými pánevními kvartérními sedimenty leží převážně slaná jezera, se zasutými svahy, dna jsou pokryta rozsáhlými koluvii, místy i eolickými sedimenty. Terasové fluvialní limnické systémy odpovídají střídání fluvialních fází s glaciálními v období pleistocénu (Černík, Sekyra 1969).

Relativní výšky pohoří obvyčejně nepřesahují 1000 m, takže velehorská modelace přes značnou absolutní nadmořskou výšku se tu projevuje jen lokálně. Značná kontinentalita podnebí ovlivňuje zalednění, ledovce jsou nevelkého rozsahu a končí ve výšce 5000-5200 m. Sněžná čára má jednu z největších poloh na světě. Ledovce tají jen poměrně krátkou dobu v letním období a jejich toky zanikají v sutích a morénách (Černík, Sekyra 1969).

Klima.

Pohoří má čistě kontinentální klima: pozdní léto, v říjnu napadne nepříliš mnoho sněhu. Během zimy se vyskytují silné mrazy a studené větry (Černík, Sekyra 1969).

Nicméně pohoří hraje významnou roli ve formování klimatu celého regionu, neboť ovlivňuje směr monzunu a rozděluje jej na dvě větve: severovýchodní a severozápadní, vanoucí na území Indie a Číny (Merzlyakova 2002).

Intenzivní ohřívání povrchu vede k formování oblasti nízkého tlaku nad jihovýchodní části plató. Teplota vzduchu, vytékajícího z monzunu, klesá adiabaticky, což v některých výzkumech bývá označováno za hlavní příčinu suchosti této oblasti (Merzlyakova 2002).

Vegetace.

Vegetace má stepní a pustinný charakter. Pevládají zde porosty bělostníku (*Europia ceratoides*), akantolimonu (*Acantholimon diapensoides*), kozince (*Astragalus malcolmii*), všivce (*Pedicularis chielantifolia*), pelyňku (*Artemisia wellbyi*), metlice, kavylu, lipnice atd. Na hřebenech v alpínské zóně lze nalézt překrásné modře kvetoucí máky, dále astry a indický *Nardostachis jatamansi*. Největších výšek dosahují (do 5800 m) *Arenaria holostoides*, *Delphinium bruninianum*. Dřeviny jsou zastoupeny pouze

nízkými keři: *Juniperus recurva*, *squamosa*, *Tanacetum tibeticum*. HHL je zde tvořena převážně druhem *Juniperus tibetica* (Šlégl et al. 2001, Miehe et al. 2007).

7.7 Kchun-Lun, Altyn-tagh, Nan-šan a Transhimálaj

Geologická stavba a geomorfologie

Severní horské řetězy Khun-Lunu jsou tvořeny zejména břidlicemi a pískovci, střední a jižní větve rulami, žulami a krystalickými břidlicemi. V horách Transhimálaje nalezneme slepence a pískovce, které se sedimentovaly na starších krystalických rulách (Šlégl et al. 2001).

Klima

Pásmová pohoří rovnoběžkového směru se vyznačují odlišným podnebím ve své západní a východní části. Na většině tohoto území dominuje kontinentální podnebí. Jeho sušší charakter je dán srážkovým stínem a blízkostí horkých pouští. Monzun zasahuje zčásti jižní svahy Transhimálaje. Východní část Tibetu zasahuje jihočínský monzun (Černík, Sekyra 1969).

Zima je dlouhá, s ledovými větry a teplotami klesajícími až k -40°C , léto je krátké a poměrně chladné. Kontinentální podnebí ovlivňuje úroveň zalednění, které proto nedosahuje velkých rozměrů. Řeky vytékající z nich v létě, zanikají v sutích a morénách (Černík, Sekyra 1969).

Oblačnost a srážky se značně liší mezi vnitřními a okrajovými oblastmi. Ve vnitřních oblastech a stíněných oblastech Transhimálají jsou poměrně nízké. Na SZ a vlhkém JV jsou větší a mohou dosahovat až 4300 mm jako na stanici Yadong (Černík, Sekyra 1969).

Vegetace

V místech, kam zasahuje monzun, pokrývají jižní svahy Transhimálaje, zejména pak východní oblasti Tibetu a Khun-lunu, lesní porosty. Do výše 4000 m se vyskytuje *Picea schrenkiana*, *Juniperus*, *Abies pindrow*, *Abies densa*, *Abies spectabilis*, v nižších polohách roste *Quercus semecarpifolia* a *Betula utilis* (Černík, Sekyra 1969, Schickoff 2005).

8 Výpočet základních teplotních charakteristik pro polohy horní hranice lesa ve Vysoké Asii

Praktická část práce byla zaměřená na výpočet určitých teplotních charakteristik vztahujících se k vegetačnímu období a jejich aplikování na základní hypotézy o formování HHL. Cílem bylo pro vybrané množství identifikovaných maximálních pozic hranice lesa spočítat následující teplotní charakteristiky: průměrnou teplotu nejteplejšího měsíce, průměrnou teplotu třech (M3), čtyř (M4) a pěti (M5) nejteplejších měsíců a počet dní s teplotou nad 5°C (DM5).

Metodika

Nejdříve byly ve studovaném území identifikovány maximální pozice horní hranice lesa, a to buď s využitím literatury (Schickhoff 2005, viz příloha 1) anebo pomocí Google Earth, kde byly systematicky vyhledávány nejvyšší polohy hranice lesa v „hluchých“ místech nepokrytých literaturou. Pro výpočet bylo použito 74 lokalit horní hranice lesa rovnoměrně rozložených po celém studovaném území (viz příloha 2). Pro každý „bod“ hranice lesa byla identifikována nadmořská výška a zeměpisné souřadnice, a to buď z literatury nebo na základě modelu SRTM 90 m. SRTM 90 m.

Pro výpočet teplotních charakteristik byla použita databáze CRU TS 3.0 z Climatic Research Unit (New et al. 2002). Tento datový soubor se skládá z pravidelného gridu měsíčních průměrných teplot pro periodu 1961 – 1990 s rozlišením v 0,5°. Grid vznikl interpolací homogenizovaných teplotních řad z klimatických stanic a je platný pro model reliéfu se stejným rozlišením.

Průměrné měsíčné teploty pro každý bod se vždy spočítaly na základě hodnoty buňky teplotního rastru za období 1961 – 1990 v databázi CRU TS. Pro převod získaných hodnot do absolutních teplot byl použit následující vzorec:

$$t_r * 0,54 - 85 = t_a$$

kde t_r značí teplotu získanou z rastru (teploty na klimatických stanicích v blízkosti HHL) a t_a značí absolutní teplotu daného bodu na HHL (Climatic Research Unit)

Pak byla provedena extrapolace teplot výškové úrovně elevačního modelu teplotní databáze na výšku HHL. Pro výpočet byl použit základní vertikální teplotní gradient 0,6 °C/100 m (Malyshev 1993).

Na základě určených dat byly spočítány základní teplotní charakteristiky: průměrná teplota nejteplejšího měsíce (července), M3 (červenec, srpen a září), M4 (červen, červenec, srpen a září), M5 (květen, červen, červenec, srpen a září) a DM5 (viz příloha 2).

Počet dnů s teplotou nad 5°C byl zjištěn z grafu, ukazujícího průměrné měsíční teploty. Po vytvoření trendu z měsíčních hodnot (polynomickou funkcí) byla odečtena část roku v níž linie trendu překročila hranici 5°C.

Dalším krokem bylo spočítání variability daných ukazatelů s cílem určení nejvhodnějšího ukazatele vztahujícího se k poloze HHL, tedy indikátoru s nejnižší variabilitou. Použila jsem tři různé statistické charakteristiky: aritmetický průměr, variační koeficient a medián (viz tab. 5). Nejméně vhodným z nich je průměr, protože je ovlivněn extrémními hodnotami, které se ve studované oblasti díky velké ploše a různorodosti mikroklimatu a mikroreliefu vyskytují poměrně často.

Výsledky

Analýza ukázala, že pro medián a aritmetický průměr je charakteristická stejná tendence změn: největší hodnoty jsou pozorovány pro indikátor M1 a M3, nejmenší pak pro M4 a M5 (viz tabulka 6). To souvisí se zvětšováním rozsahu teplot a zapojením nižších průměrných teplot v červnu a květnu v porovnání se srpnem a zářím. Kromě toho, pro hodnoty M5 v obou případech je charakteristický náhlý pokles v porovnání s hodnotami M1, M3 a M4, což je vysvětlováno značně nižšími teplotami v květnu, v porovnání s letními měsíci a zářím.

Jak už bylo řečeno, aritmetický průměr se nejméně hodí pro danou analýzu, protože je závislý na extrémních hodnotách. Medián, naopak, tyto hodnoty v úvahu nebere. Což je vidět i na základě daných výpočtů: hodnoty aritmetického průměru jsou pro všechny ukazatele větší než hodnoty mediánu (viz tabulka 6).

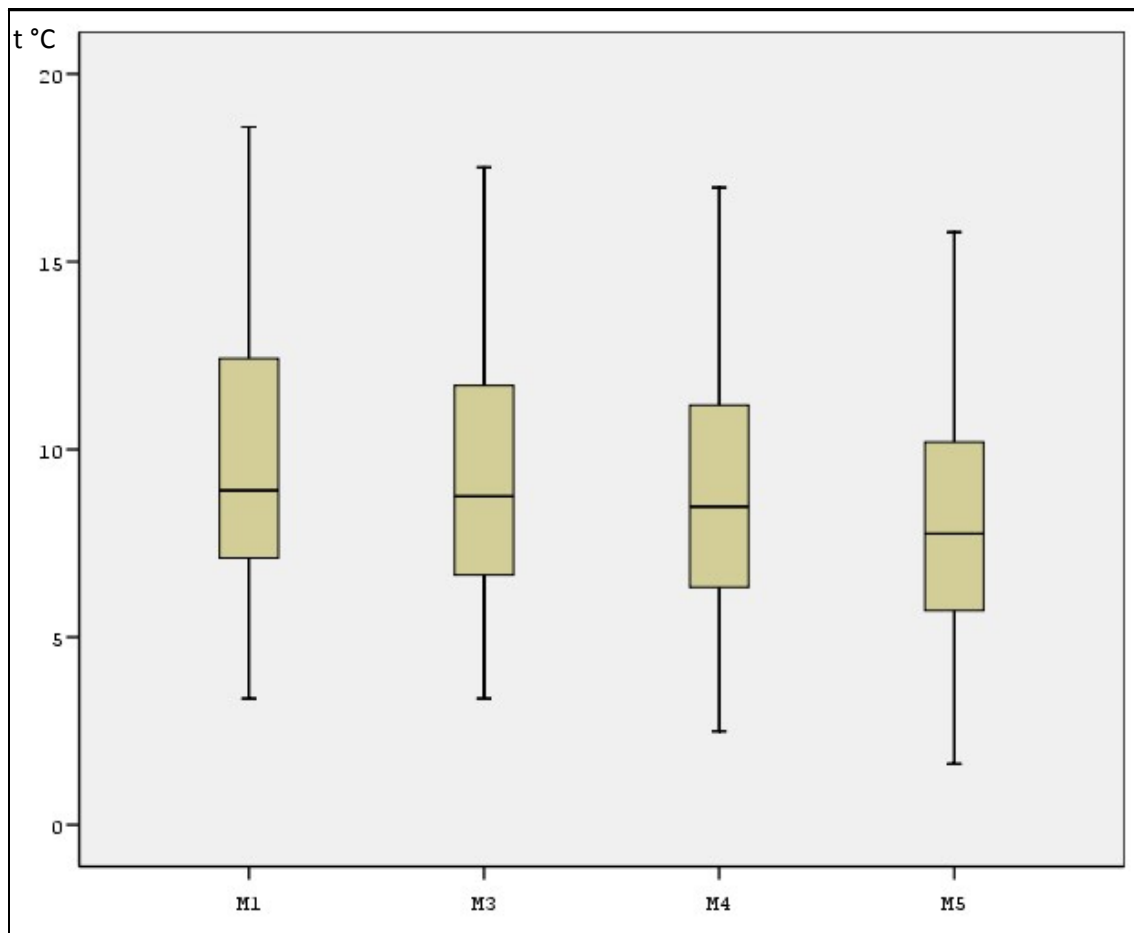
Variační koeficient je závislý na průměru a směrodatné odchylce. Nejmenší jeho hodnota (0,34) v daném výzkumu je charakteristická pro ukazatel M1. Největší hodnotu (0,38) vykazuje ukazatel M5 (viz tabulka 6). Toto se dá vysvětlit tím, že během července jsou teploty rozloženy více méně rovnoměrně, minimum se rovná 6,03°C a maximum 16,77°C (bod 29 a 19, viz obrázek 8). Se zvětšováním období použitého pro výpočet průměrných hodnot se zvětšuje rozsah teplot s tím, že průměrné maximální teploty zůstávají stejné a minimální průměrné teploty klesají (nižší teploty v červenci a květnu). Spolu s tím klesne i směrodatná odchylka.

Tabulka 6: Základní statistické charakteristiky vypočtené na základě M1, M3, M4, M5 a DM5.

Statistická charakteristika	M1	M3	M4	M5	DM5
Průměr (°C)	9,80	9,28	8,80	8,09	136,42
Variační koeficient	0,34	0,35	0,36	0,38	0,36
Medián (°C)	8,91	8,75	8,47	7,75	145

Výše diskutované charakteristiky našeho výzkumného souboru zachycuje obrázek 7.

Obrázek 7: Variabilita základních jednotlivých charakteristik vegetačního období



Hodnoty variačního koeficientu u různých teplotních indikátorů se, jak jasně ukazuje obrázek 7, výrazně neliší, na rozdíl od hodnot mediánu a aritmetického průměru.

Z grafu je vidět, že nejmenší variabilitu mají průměrné teploty čtyř nejteplejších měsíců. Průměrná teplota pro dané období se rovná 9,3°C, minimální teplota klesne pod 3°C, a překračuje minimum, které je podle Körnera (1999) potřebné pro aktivizaci metabolických procesů. M5 se pro naši analýzu za výskytu ještě nižších teplot hodí méně. Avšak nedostatkem všech ukazatelů je to, že jsou spočítány na základě měsíčních dat. Vhodnější by zde bylo provést analýzu, založenou na denních teplotách.

Průměrný počet dnů s teplotou nad 5°C, tj. délka vegetačního období, se rovná 136,4 dnům (viz tabulka 6). Variační koeficient se rovná 0,36 (což se výrazně neliší od hodnot ostatních indikátorů).

Rozložení jednotlivých teplotních indikátorů dle studovaného území je představeno na obrázcích 8, 9, 10 a 11.

Na základě níže prezentovaných map lze obecně říci, že nejvyšší průměrné hodnoty teplot všech indikátorů (vyšší než 10°C) se koncentrují v severozápadní části sledovaného regionu (Pamír, Hindúkuš a severozápadní část Himálaj), kde jsou teploty nejméně ovlivněny kontinentalitou. Je však třeba zdůraznit, že největší regionální rozdíly jsou charakteristické pro průměrnou teplotu července (viz obrázek 8). Spolu s tím, jak indikátory (M3, M4 a M5) zahrnují větší část roku, dochází k poklesu regionálních rozdílů v průměrných teplotách, což ilustrují obrázky 9, 10 a 11.

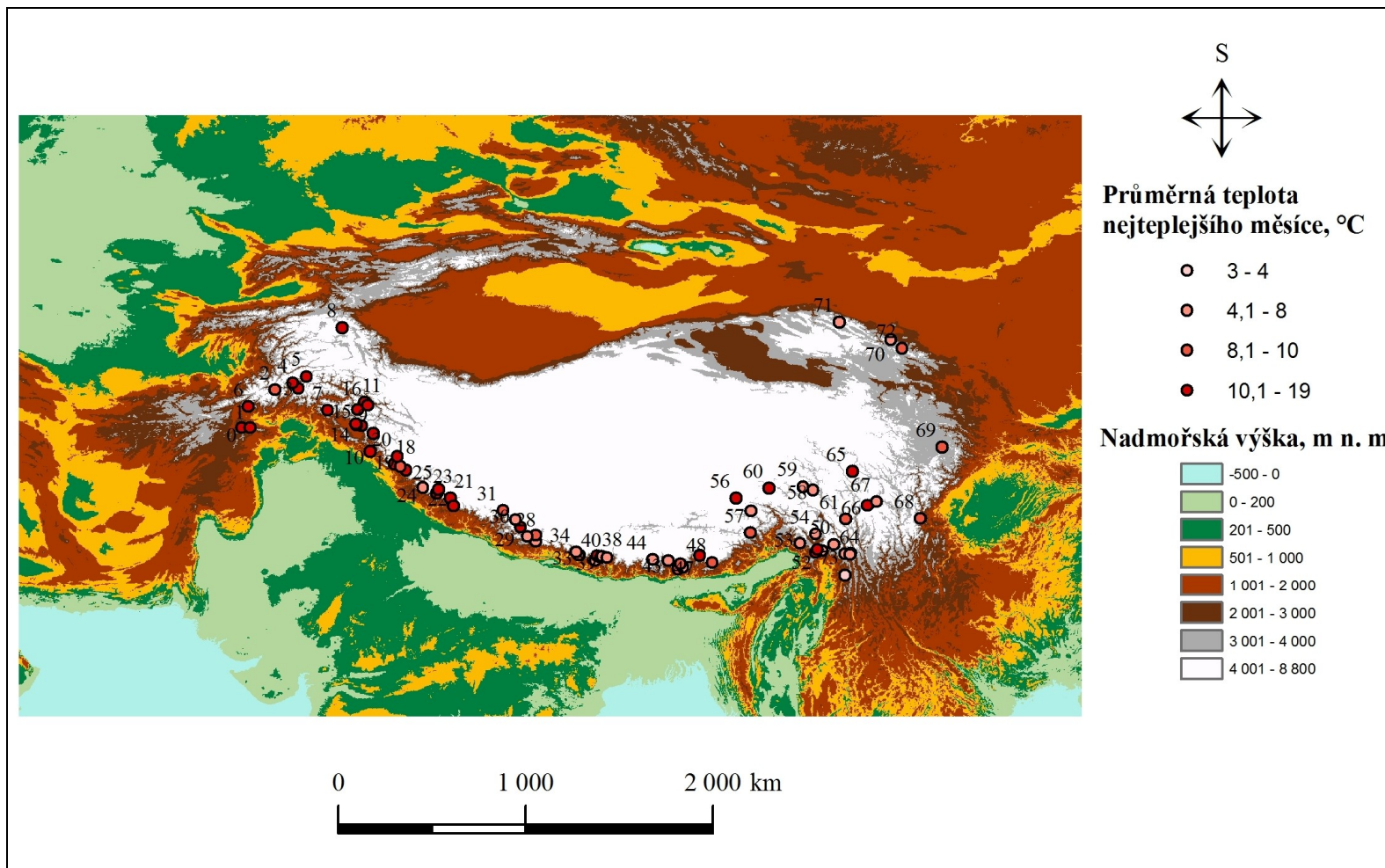
Nejnižší hodnoty průměrných teplot pro všechny indikátory lze nalézt v bodech 58, 71 a 73. Přičemž pro indikátory M4 a M5 průměrná teplota klesá pod 3°C, zatímco v případě indikátorů M1 a M3 se tato hodnota pohybuje v rozmezí 3°C až 4°C.

Je zajímavé, že až na několik výjimek (body 56, 60, 65 a 66 a to jen pro indikátory M1 a M3) zůstávají hodnoty naměřených teplot u všech indikátorů více méně stabilní (v intervalu 4°C až 10°C), přestože dochází k jejich ovlivnění nižšími teplotami přibývajících měsíců. Toto kontrastuje s předchozím zjištěním o průměrných teplotách v severozápadní části analyzovaného regionu.

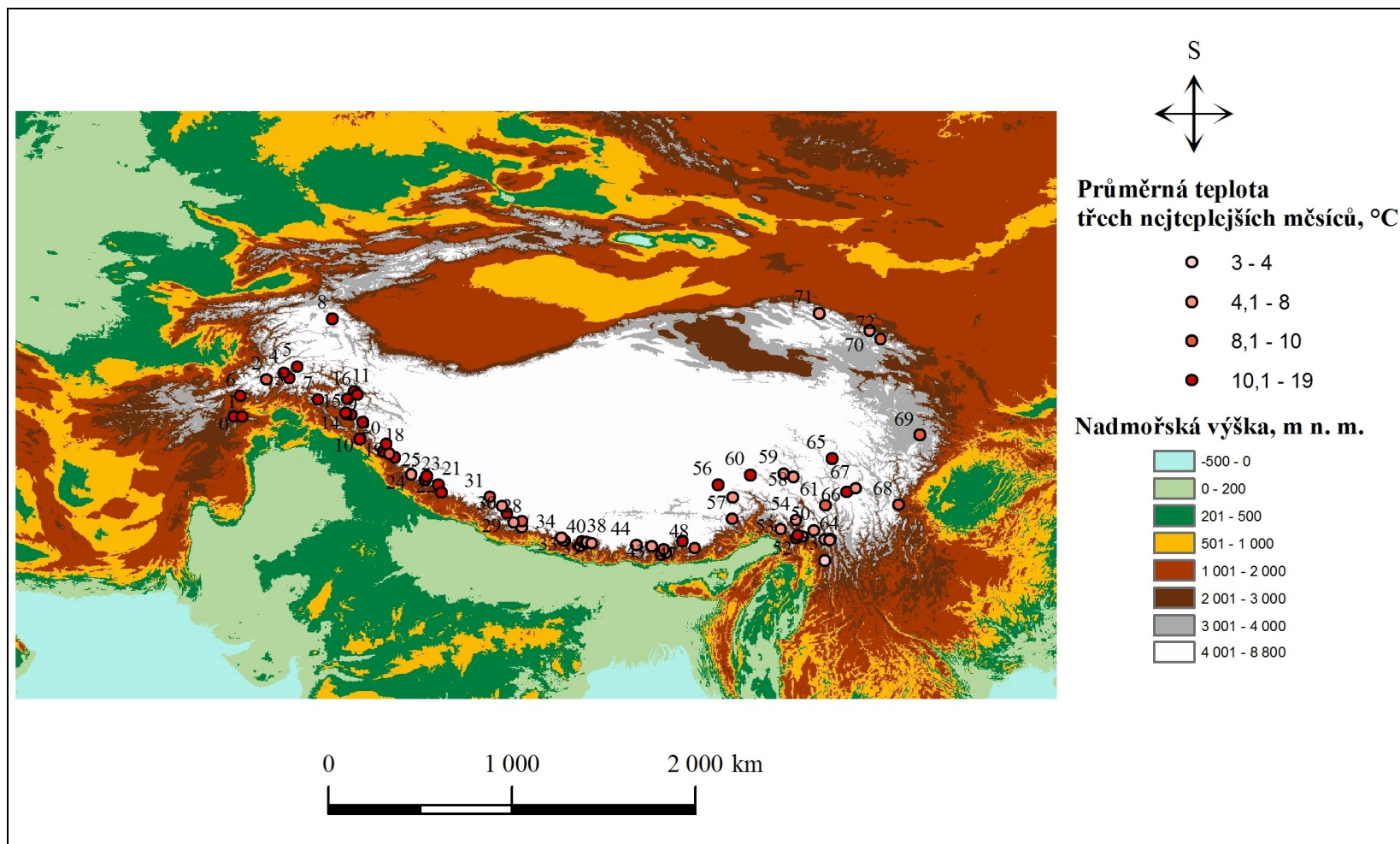
Počet dnů s teplotami nad 5°C je rozložen poměrně nerovnoměrně podél celého území (viz obrázek 12). Ve třech lokalitách (body 59, 72 a 74) nebyl pozorován žádný den s teplotou nad 5°C. Obecně největší počet dnů s danými teplotami je charakteristický pro severozápadní část regionu, směrem na jihovýchod hodnota klesá. To koreluje s poklesem průměrných teplot nejteplejších měsíců, jak bylo popsáno výše.

Vysvětlení a implikace ve vztahu k HHL výše diskutovaných zjištění budou představeny v následující kapitole – diskuzi.

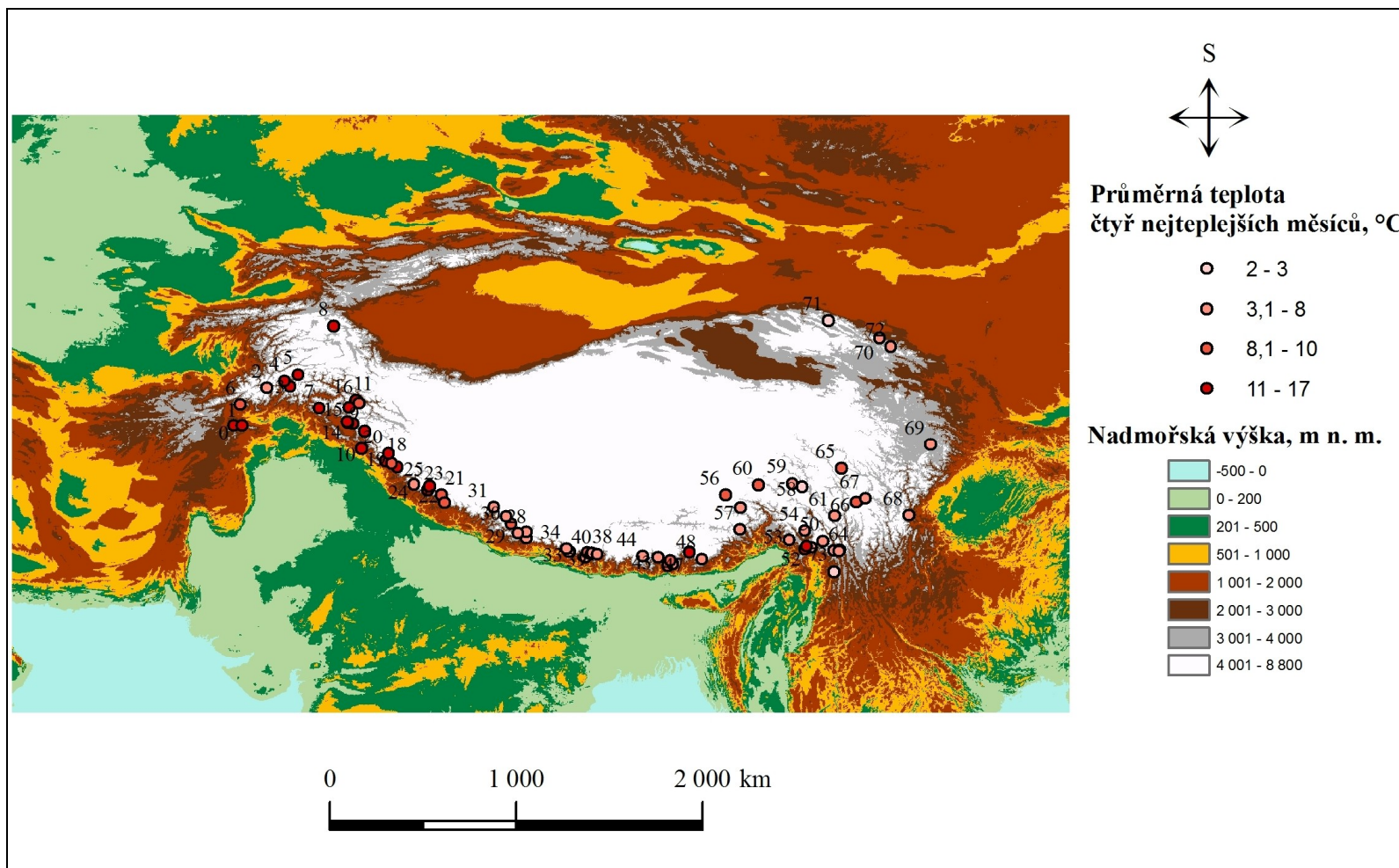
Obrázek 8: Rozložení teplot nejteplejšího měsíce v °C



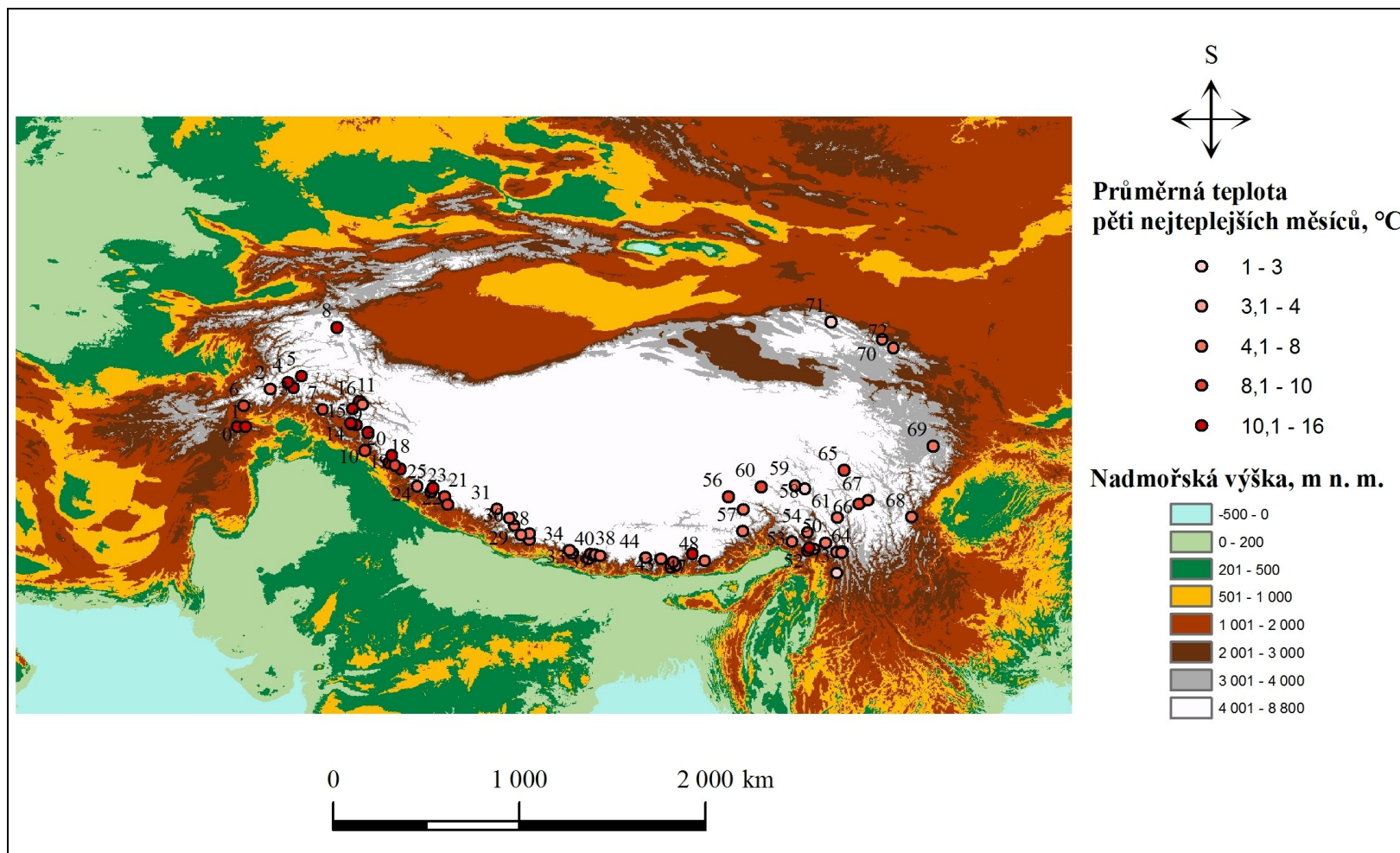
Obrázek 9: Rozložení teplot třech nejteplejších měsíců v °C



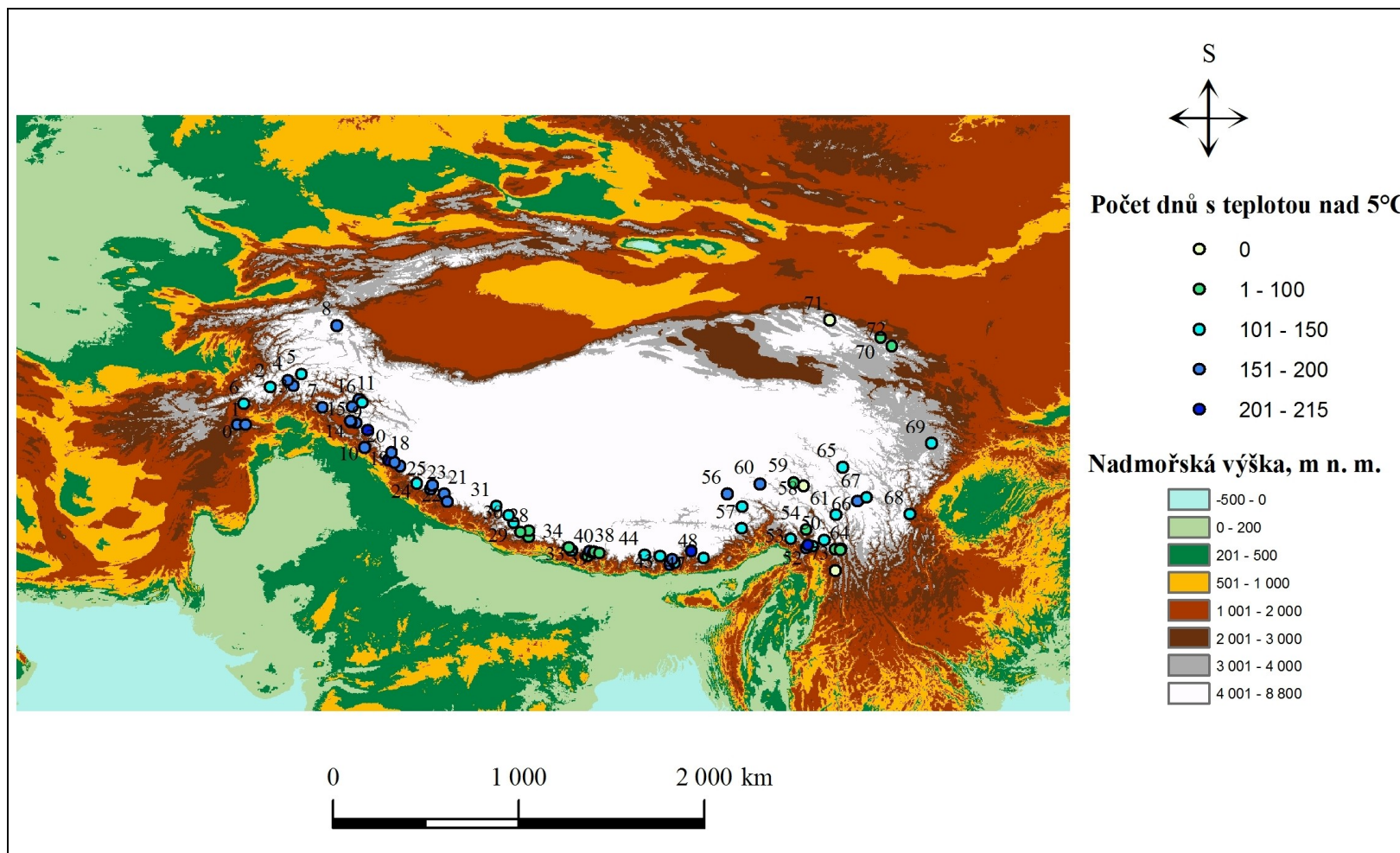
Obrázek 10: Rozložení teplot čtyř nejteplejších měsíců v °C



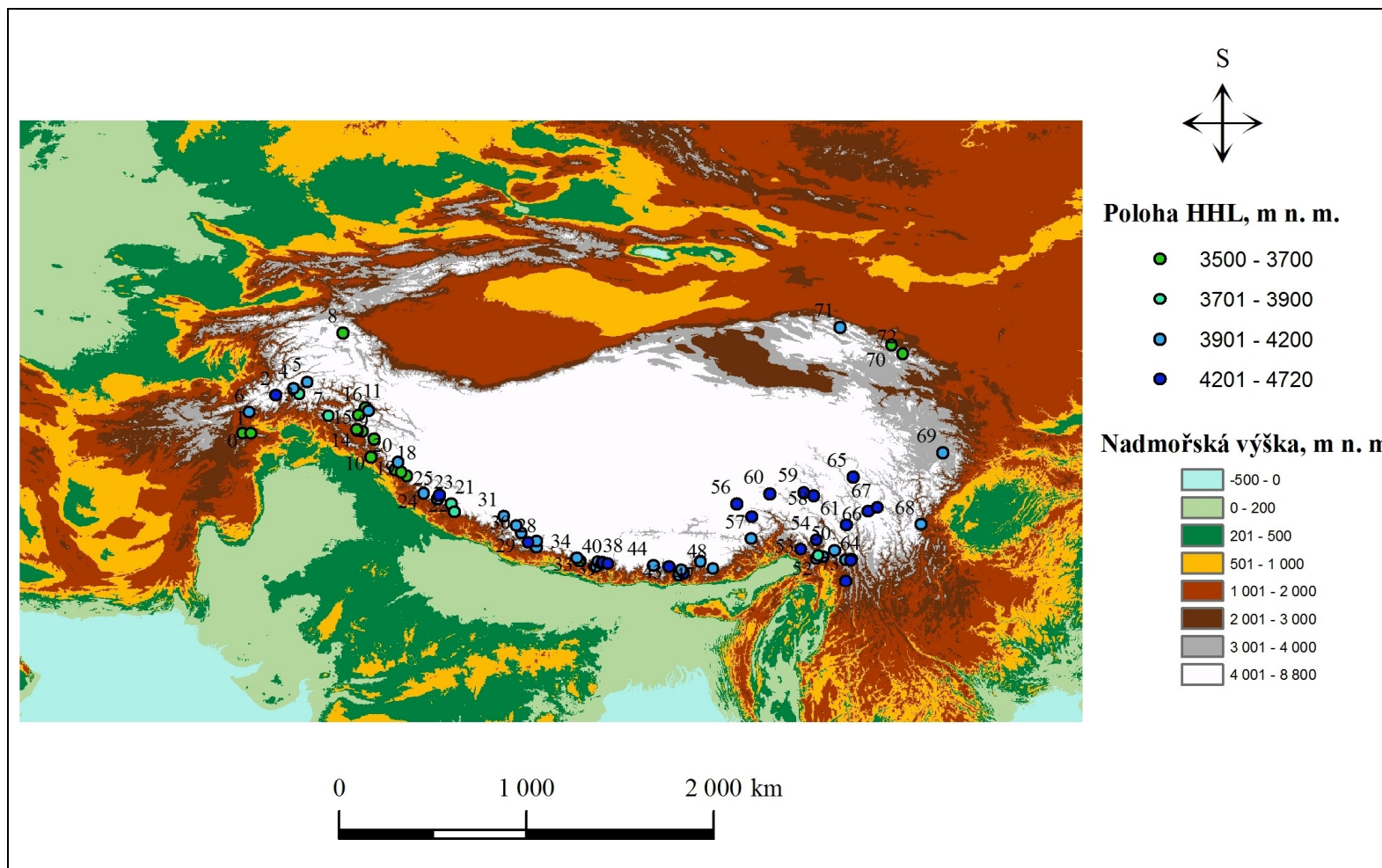
Obrázek 11: Rozložení teplot pěti nejteplejších měsíců v °C



Obrázek 12: Počet dnů s teplotou nad 5°C



Obrázek 13: Poloha horní hranice lesa ve vybraných lokalitách, m n.m.



Diskuze

V této části práce se pokusím o srovnání našich výsledků z regionu Vysoké Asie s výsledky jiných studií z různých horstev.

Nejdříve se zaměřím na interpretaci a analýzu dat představených v praktické části. Ve druhém kroku se pokusím zhodnotit vliv modulačních faktorů. V poslední části diskuze dojde ke zhodnocení dopadu orografických, klimatických a edafických podmínek na druhové složení ekotonu.

Körner stanovuje průměrnou hodnotu vegetačního období na HHL na 5°C až 7,5°C, což v našem zájmovém regionu koresponduje s hodnotami indikátoru M5 (medián se rovná 7,75°C). Ukázalo se totiž, že většina spočítaných hodnot indikátorů (M, M3 a M4) nespadá do Körnerova rozmezí.

Jiné studie (např. Schickoff 2005) považují za určující teploty vegetačního období na HHL v rozmezí 6°C – 7°C. K těmto hodnotám se opět nejvíce přibližuje indikátor M5. Je nutné poznamenat, že Schickoff (2005) odvodil hodnotu 6°C až 7°C na základě studia Himálají, Karakorámu a Hindúkuše. Vzhledem k tomu, není překvapivé, že jsme získali hodnoty souhlasící s Schickoffem.

Studie prováděné na základě vysokohorských lesů tropických oblastí, kam částečně zasahuje studovaná oblast, stanovovaly teploty vegetačního období na 8°C až 9°C (Wineger 1981). V tomto případě s uvedenými hodnotami nejvíce souhlasí indikátor M4 (medián se rovná 8,47°C, průměr – 8,8°C).

Ukázalo se, že indikátor M1 není vhodným ukazatelem pro určování HHL, neboť je počítán na základě menšího počtu dnů, než kolik jich zahrnuje vegetační období.

Z toho plyne, že pro výzkum je důležité, na základě jakých teplot se vymezuje vegetační období. V naší studii pro výpočet délky vegetačního období byl využit počet dnů s teplotou nad 5°C (DM5, viz obrázek 12). Bylo zjištěno, že průměrná délka vegetačního období v studované oblasti se rovná 136,4 dnům. Nicméně tři body nevykázaly ani jeden den s teplotou nad 5°C. Tento fakt ukazuje na to, že pro výpočet délky vegetačního období bude efektivnější uvažovat s počtem dnů s průměrnou teplotou nad 0°C (Malyshev 1992 a Malyshev, Nimis 1997). Což v případě studované oblasti, zejména Himálají a Pamíru, nabývá na významu zejména z toho důvodu, že tento ukazatel odráží mimořádně vysoké amplitudy denních teplot, které jsou charakteristické pro tropické oblasti. V závislosti na tom, jakou teplotu použijeme pro výpočet délky vegetačního období, se bude lišit efektivita indikátorů v určování HHL. V případě výpočtu na základě teplot nad 5°C bude vhodnější indikátor M3, zatímco při využití teplot nad 0°C indikátor M4.

Na druhou stranu je však nutné připomenout, že podle Körnera (1999) minimální teplotou pro růst stromů a dělení buněk jsou 3°C. Z toho plyne, že by zřejmě bylo možné nalézt (zkonstruovat) ještě vhodnější teplotní indikátor, vztahující se k poloze HHL (viz kapitola 5).

Zajímavější je však analýza polohy HHL v těch případech, které se vymykají obecně uznávaným teplotám vegetačního období na HHL. Námi zjištěné hodnoty u indikátorů M1 a M4 se totiž v některých případech značně odlišují od hodnot, k nimž dospěl ve své předchozí studii Schickoff (2005) ve stejné geografické oblasti (viz příloha 4). Ačkoliv většina našich dat koresponduje s Schickoffovými, je nutné zmínit, že naše studie našla mnohem větší rozpětí teplot na HHL. Zejména body (např. 10, 14, 47) ležící v severozápadní části regionu vykazují extrémně vysoké hodnoty, zatímco řada bodů (např. 72, 74, 59) z jihovýchodní části oblasti vykazují hodnoty extrémně nízké (viz příloha 4).

Při srovnání našich extrémních hodnot s extrémy Schickoffovými, dospíváme k závěru, že rozdíly v minimálních hodnotách jsou menší než rozdíly v maximálních teplotách a to jak pro indikátor M1, tak i M4. Dále platí, že indikátor M4 vykazuje větší rozdíly než indikátor M1. Příčiny rozdílných extrémů mohou mít několik zdrojů. Primární zdroje těchto rozdílů lze vidět na jedné straně v odlišné metodice (uplatnění různých teplotních gradientů), na druhé straně však také ve specifických lokálních podmínkách (antropogenní činnost, specifické orografické a edafické podmínky), neboť naše body měření nejsou shodné s body měření Schickoffa.

Právě fakt, že indikátor M4 (který je datově bohatší) vykazuje ve svých maximech i minimech výraznější rozdíly než indikátor M1, lze považovat za nepřímé potvrzení vlivu odlišných metodik na výpočet teplotních charakteristik HHL. S větším množstvím použitých dat totiž dochází k nárůstu chyb.

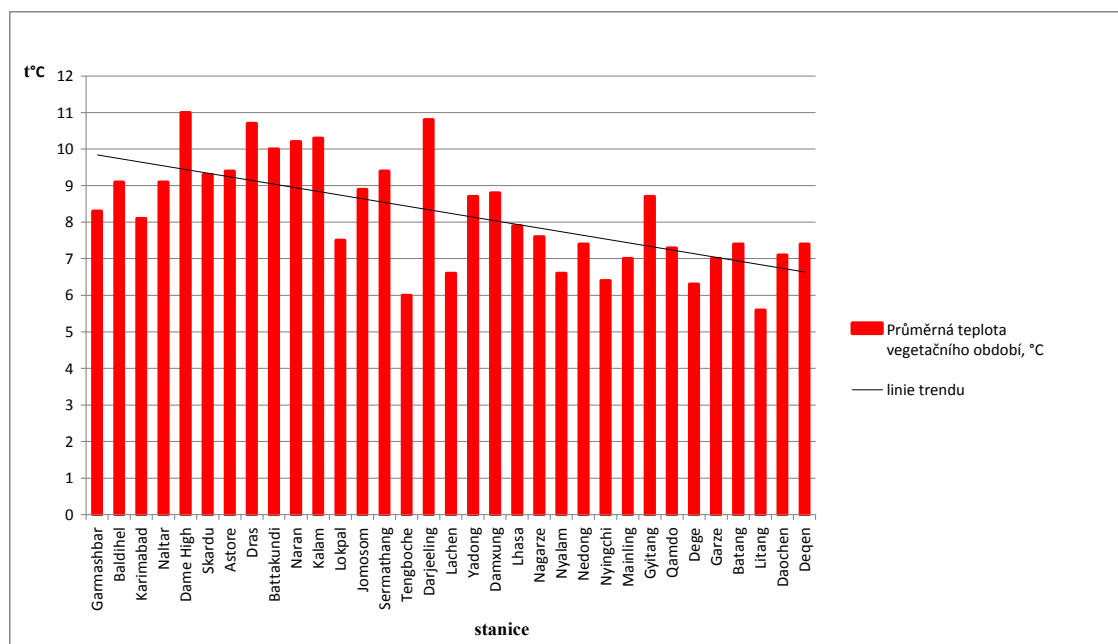
Výše diskutované teplotní charakteristiky představují hlavní globální faktory ovlivňující polohu HHL, nicméně vzhledem k tomu, že se region Vysoké Asie rozkládá na obrovské ploše (od 26° do 37° s. z. š.), je zde poloha HHL silně modifikována regionálními specifiky. Patří mezi ně zejména kontinentalita klimatu, monzuny, složitá konfigurace horních hřbetů střídajících se s horskými údolími, jejich poloha vůči převládajícím směrům větrů, režim srážek, lokální edafické a biotické podmínky, výskyt permafrostu. Tyto faktory společně značně upravují základní vztah zeměpisná šířka – poloha HHL. Například jen na 28° s. z. š. se výška HHL mění od 3650 m n. m. do 4500 m n. m. (Schickoff 2005).

Jak bylo ukázáno na mapách 9, 10, 11, 12, největší průměrné teploty jsou charakteristické pro severozápadní oblast studovaného regionu. Významným faktorem extrémních teplotních hodnot je kontinentalita klimatu způsobující suchá a horká léta. Určitý vliv na vysoké letní teploty má i efekt hmotnatosti pohoří. Naopak v zimě tyto

faktory v důsledku mimořádně nízkých teplot a úhrnu srážek způsobují intenzivní poškození mrazem a zimní vysychání.

Při pohybu východním směrem se zvyšuje množství srážek v důsledku působení monzunů, s klesající kontinentalitou klesají roční amplitudy teplot a průměrné teploty vegetačního období (viz obrázek 14).

Obrázek 14: Průměrná teplota vegetačního období na klimatických stanicích v systému Himálaj-Hindúkuš-Karakorám °C (Schickoff 2005)



Kvůli poklesu průměrných teplot vegetačního období při pohybu jihovýchodním směrem, se zároveň zvyšuje poloha HHL (SZ – JV gradient zvyšování, viz obrázek X). Avšak v některých lokalitách (jako body 3, 70 a 72) jsou pozorovány odchylky od obecného trendu. Vyšší polohu HHL v bodě 3 (4400 m n.m., viz obrázek 13) pravděpodobně vysvětluje výskyt reliktních lesů nad klimatickou HHL. Toto tvrzení je podporováno i výskytem nízkých průměrných teplot pro všechny spočítané indikátory. Nižší polohy HHL v bodech 70 a 72 lze vysvětlit vlivem extrémní kontinentality, srážkovým stínem a hmotností pohoří a tedy i nižšími průměrnými teplotami.

Jedním ze základních faktorů určujících polohu HHL na lokální úrovni je expozice svahu. V subtropických oblastech, kam do značné míry spadá zkoumaný region, je rozdíl mezi intenzitou dopadajícího slunečního záření na jižní a severní svahy poměrně velký. Například v Himálajích je HHL na jižním sklonu o 250 m výše než na severních svazích. V Tibetu je tento rozdíl ještě větší, když rozdíl polohy HHL na jižních a na severních svazích dosahuje 300 až 450 m. Největší rozdíl je charakteristický pro semiaridní a semihumidní oblasti a oblasti s dlouho ležícím sněhem (například, severozápadní oblasti Vysoké Asie) (Schickoff 2005). Expozice svahu

poměrně silně ovlivňuje i půdní teploty. Například, v hloubce 5 cm ve výšce 3600 m na jižních svazích se počet dnů se zamrzáním a rozmrzáním svrchního půdního horizontu rovná 42, když na severních jen 2 (Schickoff 2005).

S rostoucím množstvím srážek podél Východních Himálají (např. stanice Darjeeling viz příloha 3), se rozdíl mezi jižními a severními svahy smazávají, na obou svazích se objevují stromové porosty ve stejných výškách (Miehe, Miehe 2000).

Dalším významným faktorem ovlivňujícím polohu HHL jsou místní edafické poměry. Dle Körnera (1999) se průměrná půdní teplota na HHL rovná 5,5°C. Přičemž minimální půdní teplota dostatečná pro růst stromů se rovná 3,2°C (Körner, Paulsen 2004). Pozorování na stanici Damé high, která se nachází ve výšce 3780 m n. m. (o 30 m výše než HHL), ukazují, že průměrné půdní teploty na HHL jsou vyšší, než průměrné roční teploty vzduchu. V hloubce 5 cm se průměrná půdní teplota rovná 5°C, v hloubce 20 cm 4,6°C (průměrná teplota vzduchu je 1,1°C). V hloubce 5 cm se průměrné teploty během roku mění od -2,7°C v lednu do 15,6°C v červenci. Od dubna do listopadu jsou kladné, ale jen od května do října jsou dostatečné pro trvalou biologickou aktivitu a mineralizaci živinami. Průměrné půdní teploty nejteplejšího měsíce v hloubce 5 cm dosahují 15,6°C (průměrná teplota vzduchu je 13°C). Teploty v této hloubce mají poměrně velké denní amplitudy a to až až do 27,5°C. Průměrné maximum půdních teplot nastává v srpnu a rovná se 34°C. Maximální teplota v hloubce 5 cm byla zaregistrována v červenci roku 1992 a dosáhla 52,3°C. Tyto teploty jsou těžko snesitelné pro hygrofilní semenáčky druhů *Picea* a *Abies* (Schickoff 2005).

Ve výškách mezi 3000 – 3900 m půdní teplota v lednu klesne o 0,77°C / 100 m, v srpnu pak o 0,82°C / 100 m (Schickoff 2005). To ukazuje na dosti rychlý a nepříznivý vliv na kořenovou aktivitu stromů.

Nízké půdní teploty ve studovaném regionu vytvářejí vhodné podmínky pro výskyt permafrostu. Výzkum, provedený mezi roky 1990 a 1999 naměřil v průměru 73 dní se zamrzáním a rozmrzáním svrchního půdního horizontu. V hloubce 30 cm jde o 69 – 70 dní. Proces zamrzání – rozmrzání silně (negativně) ovlivňuje kořenový systém (Weber 2000).

Typ půd má významný vliv na druhové složení ekotonu. Různé půdy jsou podkladem pro tvorbu rozmanité vegetační mozaiky v této oblasti. Rozdíly v edafických podmínkách na svazích s různou expozicí dávají možnost tvrdit, že fyzické parametry půdy (ve značné míře určené mateční horninou) mají větší vliv na vegetaci než chemické vlastnosti (Schickoff 2005).

Koluviální půdy jsou typické na HHL. Stabilita morfodynamických procesů do značné míry determinuje intenzitu formování půdy. V sušších oblastech na severních svazích se tvoří vhodné ekologické podmínky pro tvorbu půd, jádro nedávné pedogeneze (Schickoff 2005). Podobné podmínky jsou charakteristické pro jižní svahy Himálají v Kali Gandaki, kde nejvyšší půdní biologická aktivita je mezi 3300 a 3400 m.

V semihumidních a humidních podmínkách jsou půdy v Himálajích kyselé a obsahují velké množství nerozloženého organického materiálu. Podobné půdy byly popsány i v Tibetu na Namcha Barwa a na Yunnan a Sichuan. Na jižních svazích jsou nejvíce rozšířené regosoly s vysokou výměnou kationů a bazální saturací (Schickoff 2005).

Vítr na rozdíl od výše diskutovaných faktorů nepůsobí tak významně na polohu HHL ve Vysoké Asii. Jeho průměrná rychlost na stanicích Baldihel, 3900 m n. m., a Damé High, 3780 m n. m., dosahuje jenom 1,9 – 2,8 m/s (v Alpách 7 – 10 m/s). Dokonce i při silných nárazech větru rychlost dosahuje jen 16 – 17 m/s (70 m/s v Rocky mountains). Průměrná rychlost je mírně větší během zimních měsíců, kdy převládá západní směr proudění (Schickoff 2005).

Avšak, vítr zvyšuje evapotranspiraci, relokaci sněhu a pravděpodobnost mrazového sucha. To se projevuje v ostrém viditelném rozdílu polohy HHL na závětrných a návětrných sklonech. Například, na od větru odstíněných sklonech, porosty *Betula utilis* dosahují vyšších elevací než na návětrných svazích. Rododendron na návětrných sklonech je nahrazen trpasličí alpínskou vegetací (Schickoff 2005).

Obecně platí, že základním druhem stromů tvořících HHL v této oblasti jsou druhy rodu *Juniperus* spp., který je mezi jehličnany nejodolnější k mrazu a je schopen snášet i nárazové klimatické stresy (zaujímá nevyšší polohy na HHL). Dále se zde lze setkat s druhy rodů *Abies*, *Picea*, *Pinus*, *Salix* atd. (viz příloha 1). Připomeňme, že druhy rodu *Abies* mohou bezproblémově růst i v podmínkách nedostatečného množství dusíku, což podle některých autorů (Sveinbjornsson et al 2010) má určující vliv na vznik horní hranice lesa. V případě tohoto druhu se tedy jedná o adaptivní mechanismus vůči limitujícím podmínkám vysokohorského prostředí. V severní a severozápadní části regionu jedním z převládajících druhů porostu je listnáč *Betula utilis* (viz příloha 1). Nižší zimní teploty ve Východní Himálaji, Východním Tibetu a Sichuan vedou k ústupu opadavých lesů před jehličnany a rododendrony (Schickoff 2005).

Závěr

HHL je důležitou bioklimatickou hranicí odrážející změny životních podmínek s rostoucí nadmořskou výškou. Podle různých příčin formování, můžeme odlišit její následující tvary: rozptýlená, ostrá, ostrovní a krummholz. Každý z těchto tvarů má své charakteristiky a různě reaguje na změny klimatu a změny životního prostředí, což dává možnost stanovení různých hypotéz o jejich formování. Například rozptýlená HHL je nejrozšířenějším typem a rychle reaguje na globální změny teploty, což znamená, že je především formována pod vlivem faktorů první úrovně (viz kapitola 3). Ostrá HHL naopak odráží spíše lokální podmínky, zvláštnosti orografického, edafického a mikroklimatického prostředí.

Existují čtyři hlavní hypotézy, vysvětlující vznik HHL na globální úrovni: „growth limitation theory“, „nutrient limit hypothesis“, teorie nedostatečné uhlíkové bilance a teorie omezené reprodukce.

Obecně se vychází z myšlenky, že HHL v různých světových pohořích je jevem klimatickým, to znamená, že je především určována teplotními charakteristikami. V dnešní době mnoho vědců pracuje na konstrukci takového teplotního indikátoru, ke kterému se HHL co nejbližší vztahuje. Tato práce byla zaměřena na analýzu indikátorů: Teplota nejteplejšího měsíce, teplota třech, čtyř a pěti nejteplejších měsíců a počet dnů s teplotou nad 5°C.

Nicméně, HHL je ve stejné míře i jevem biologickým, což znamená, že růst stromů ve svých maximálních polohách je omezen dostupností živin a možností rozmnožování. I když i tyto parametry jsou také ovlivněny teplotou. V této práci byl proveden jen obecný přehled těchto hypotéz bez záměru na praktické výpočty.

Teorie nedostatečné uhlíkové bilance na HHL byla zamítnuta většinou vědců, jako hlavní určující faktor HHL. Na HHL bylo prokázáno dostatečné množství uhlíku a nestrukturálních sacharidů pro fotosyntézu a navíc, že jeho ztráty respirací jsou malé, což vede k pozitivní uhlíkové bilanci. Problémem je spíše neschopnost stromů za nízkých teplot zabudovat tyto látky do svých pletiv. Obdobně ani teorie o nedostatku živin, formulovaná Sveinbjörnssonem (2000), nebyla prokázána jako hlavní vysvětlení polohy HHL. Nedostatek živin spíše vede k větší pravděpodobnosti fyziologického (mrazového) poškození a vysoké mortalitě stromů na jejich horním hranici výskytu po dlouhé zimě. Vznikají tak ostré HHL. Úspěšnou regeneraci považuje většina vědců za jedinou možnost, při které může dojít ke zvyšování polohy HHL.

Je třeba zmínit, že výzkum byl do určité míry omezen absencí adekvátních datových souborů, vyhovujících studované oblasti. Všechny zjištěné teplotní charakteristiky jsou extrapolované z příslušných klimatických stanic, obvykle položených mnohem níže než HHL. Z toho plynou určité odchylky již na prvním stupni získávání dat.

Hlavním výsledkem, kterého jsme dosáhli v této práci, je zjištění, že HHL je ovlivněna celou řadou na sobě závislých faktorů. Hlavním indikátorem je teplota, na které však závisí výživové podmínky, uhlíková bilance a regenerace. V dané oblasti je obecná klimatická HHL silně modulována lokálními faktory, které mají v daném případě hlavní vliv na dnešní vzhled HHL ve Vysoké Asii.

Existuje velké množství možných směrů pro další výzkum. Cílem této práce nebyl výzkum vlivu činnosti člověka na polohu HHL. Avšak v této oblasti se jedná o významný faktor. Hory Vysoké Asie byly dlouhodobě pod lidským vlivem a jsou jím silně pozměněny. HHL je v mnoha místech snížena, zvláště na jižních svazích, což znamená, že antropogenní vliv je jedním ze základních faktorů, určujících vzhled HHL v dané oblasti.

Co se týče „growth limitation theory“ zajímavé výsledky slibuje výzkum zbytků lesa nad klimatickou HHL, které se v této oblasti vyskytují ve velkém množství.

Seznam citované literatury

- ALDEN, J., MASTRANTONIO, J., ØDUM, S. (1993):** Forest development in cold climates. Plenum press, New York, 1993, 580 s.
- ALVAREZ-URIA, P., KÖRNER, C. (2007):** Low temperature limits of root growth in deciduous and evergreen temperate tree species. *Functional ecology*, 21, s. 211 – 218.
- ČERNÍK, A., SEKYRA, J. (1969):** Zeměpis velehor. Academia, Praha, vydání první, 396 s.
- DAUBENMIRE (1954):** Alpine Timberlines in the Americas and Their Interpretation. *Butler University Botanical Studies*, vol. 11, 119 – 136.
- DULLINGER, S., DIRNBÖCK, T., GRABHERR, G. (2004):** Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. *Journal of Ecology*, 92, s. 241-252.
- HADLEY, JK., SMITH, WK. (1990):** Influence of leaf surface wax and leaf area to water content ratio on cuticular transpiration in western conifers. *Canadian journal of forest research*, 20, 1306 – 1311.
- HARSH, M., BADER, M. (2011):** Treeline form – a potential key to understanding treeline dynamics. *Global ecology and biogeography*, s. 1 – 15.
- HÄTTENSCHWILER, S., HANDA, T., EGLI, L., ASSHOFF, R., AMMANN, W., KÖRNER, CH. (2002):** Atmospheric CO₂ enrichment of alpine treeline conifers. *New phytologist*, 156, s. 363 – 375.
- HEIKKINEN, O., TUOVINEN, M., AUTIO, J. (2002):** What determines the timberline? *Fennia*, 180: 1-2, s. 67 – 74. ISSN: 0015 – 0010.
- HOCH, G., POPP, M., KÖRNER, C. (2002):** Altitudinal increase of mobile carbon pools in *Pinus cembra* suggests sink limitation of growth at the Swiss treeline. *Oikos*, 98, s. 361 – 374.
- HOLTMEIER, FK., BROLL, G. (1992):** The influence of tree islands and microtopography on pedoecological conditions in the forest-alpine tundra ecotone on Niwot Ridge, Colorado Front Range, USA. *Arctic and Alpine Research*, vol. 24, s. 216–228.
- 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.
- KÖRNER, CH., PAULSEN, J. (2004):** A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of biogeography*, 31, s. 713 – 732.
- KÖRNER, CH., HOCH, G. (2003):** The carbon charging of pines at the climatic treeline a global comparison. *Oecologia*, 135, s. 10 – 21.
- KÖRNER, CH. (2003):** Carbon limitation in trees. *Journal of ecology*, 91, s. 4 – 17.
- KÖRNER, CH. (1999):** Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems. Springer, Berlin, 338 s. ISBN: 3-540-65054-7.
- KÖRNER, CH (1998):** A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115, s. 445 - 459.
- LI, MH., XIAO, WF., SHI, P., WANG, SG., ZHONG, YD., LIU, XL., WANG, XD., CAI, XH. & SHI, ZM. (2008):** Nitrogen and carbon source-sink relationships in trees at the Himalayan treelines compared with lower elevations. *Plant, cell and environment*, 31, s. 1377 – 1387.
- MALYSHEV, L., NIMIS, PL. (1997):** Climatic dependence of the ecotone between alpine and forest orobionts in southern Siberia. *Flora*, 192, s. 109 – 120.
- MALYSHEV, L. (1993):** Levels of the upper forest boundary in northern Asia. *Vegetatio*, 109, s. 175 – 186.
- MERZLYAKOVA, I. (2002):** The mountains of central Asia and Kazakhstan. In SHAHGEDANOVA, M. (ed.): *The physical geography of northern Eurasia*. Oxford university press, New York, s. 377 – 403. ISBN: 0-19823384-1.
- MIEHE, G., MIEHE, S., VOGEL, J., CO, S. & DUO, L. (2007):** Highest treeline in the Northern hemisphere found in Southern Tibet. *Mountain research and development*, vol. 27, č. 2, s. 169 – 173.
- MIEHE, G., MIEHE, S. (2000):** Comparative high mountain research on the treeline ecotone under human impact. *Erdkunde*, 54, s. 34–50.
- MIEHE, S. (1994):** Humidity-dependent sequences of altitudinal vegetation belts in the Northwestern Karakorum. In: ZHENG D., ZHANG Q., PAN Y. (ed.): *Proceedings of International Symposium on the Karakorum and Kunlun Mountains*. Meteorological Press, Beijing, s. 347–363.
- NEW, M., LISTER, D., HULME, M. & MAKIN, I. (2002):** A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*, 21, s. 1 – 25.
- NICOLUSSI, K., BORTENSCHLAGER, S. & KÖRNER, CH. (1995):** Increase in tree-ring width in subalpine *Pinus cembra* from the central Alps that may be CO₂-related. *Trees*, 9, s. 181 – 189.
- OHSAWA, M. (1990):** An interpretation of latitudinal patterns of forest limits in South and East Asian Mountains. *The journal of ecology*, vol. 78, č. 2, s. 326 – 339.

- PRACH, K., ŠTECH, M., ŘÍHA, P. (2009):** Ekologie a rozšíření biomů na Zemi. Scientia, Praha, 152 s. ISBN 978-80-86960-46-3.
- RICHARDSON, A., FRIEDLAND, A. (2009):** A review of the theories to explain arctic and alpine treelines around the world. *Journal of sustainable forestry*, 28, s. 218 – 242. ISSN: 1054-9811.
- RICHARDSON, A., LEE, X., FRIEDLAND, A. (2004):** Microclimatology of treeline spruce-fir forests in mountains of the northeastern United States. *Agricultural and forest meteorology*, 125, 53 – 66.
- ROSYPAL, S. et al. (2003):** Nový přehled biologie. Scientia, Praha, 802 s. ISBN: 978-80-86960-23-4.
- SCHICKOFF, U. (2005):** The upper timberline in the Himalayas, Hindu Kush and Karakorum: a review of geographical and ecological Aspects. In BROLL, G., KEPLIN, B. (ed.): *Mountain ecosystems. Studies in treeline ecology*. Springer, Netherlands, s. 275 – 354. ISBN: 3-540-24325-9.
- SCHICKOFF, U. (1993):** Man's impact on vegetation and landscape in the Kaghan valley, Pakistan. *Pakistan Journal*, s. 128–148.
- SCHERRER, D., KÖRNER, CH. (2010):** Infra-red thermometry of alpine landscapes challenges climatic warming projections. *Global Change Biology*, vol. 16, č. 9, s. 2602–2613, September 2010
- SMITH, W., GERMINO, M., JOHNSON, D. & REINHARDT, K. (2009):** The altitude of alpine treeline: a bellwether of climate change effects. *Botanical review*, 75, s. 163 – 170.
- SMITH, W., GERMINO, M., HANCOCK, T., JOHNSON, D. (2003):** Another perspective on altitudinal limits of alpine timberlines. *Tree physiology*, 23, s. 1101 – 1112.
- SVEINBJÖRNSSON, B., SMITH, M., TRAUSTASON, T., RUESS, RW,, SULLIVAN, PF. (2010):** Variation in carbohydrate source–sink relations of forest and treeline white spruce in southern, interior and northern Alaska. *Oecologia*, 163, s. 833 – 843.
- SVEINBJÖRNSSON, B. (2000):** North American and European treelines: external forces and internal processes controlling position. *Ambio*, vol. 29, č. 7, s. 388 – 395.
- ŠLÉGL, J. et al. (2001):** Světová pohoří. Asie. Balios, Praha, 288 s.
- TRANQUILLINI, W. (1979):** Physiological ecology of the alpine timberline. Tree existence at high altitudes with special references to the European Alps. Springer-Verlag, Berlin-New York, 110 s.
- TREML, V. (2009):** Modeling alpine treeline by combining climatic data sets with digital elevation models, nepublikovaný manuscript, 9 s.
- TROLL, C. (1973):** The upper timberlines in different climatic zones. *Arctic and alpine research*, vol. 5, č. 3, s. 218 – 242.

- WARDL, P. (1998):** Comparison of alpine timberlines in New Zealand and the southern Andes. Royal Society of New Zealand Miscellaneous Publications, vol. 48, s. 69–90.
- WINEGER, M. (1981):** Zur thermisch-hygrischen Gliederung des Mount Kenya. Erdkunde, vol. 35, s. 248–263.
- WIESER, G., TAUSZ, M. (2007):** Trees at their Upper Limit. Springer, Netherlands, 233 s. ISBN: 13 978-1-4020-5074-9.
- WIESER, G. (2002):** The role of sapwood temperature variations within *Pinus cembra* on calculated stem respiration: Implications for upscaling and predicted global warming. *Phyton-annales rei botanicae*, vol. 42, 1, s. 1 – 11.
- WIESER, G. (1997):** Carbon dioxide gas exchange of cembra pine (*Pinus cembra*) at the alpine timberline during winter. *Tree physiology*, vol. 17, 7, s. 473 – 477.
-
- BERDANIER, A. (2010):** Global Treeline Position [online]. Natural educational knowledge, vol. 1, č. 11 [cit. 01.05.2011]. Dostupný z WWW: <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/global-treeline-position-15897370>.
- CLIMATIC RESEARCH UNIT.** *High-resoluted gridded datasets, CRU TS 3.0* [online, cit. 01.05.2011]. Dostupný z WWW: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>.

Seznam příloh

- Příloha 1:** Geografická poloha terénních bodů (sebraných z různých literárních zdrojů a identifikovaných pomocí Google Earth)
- Příloha 2:** Základní teplotní charakteristiky vztahující se k vegetačnímu období vypočtené na základě 74 vybraných bodů (vlastní výpočty)
- Příloha 3:** Vztah klimatických dat na HHL k její nadmořské výšce
- Příloha 4:** Porovnání extrémních teplot čtyř nejteplejších (M4) a nejteplejšího (M1) měsíce na horní hranici lesa dle našich měření a dle Schickoffa (2005)

Příloha 1: Geografická poloha terénních bodů (sebraných z různých literárních zdrojů a identifikovaných pomocí Google Earth)

Nadmořská výška	Rok publikace výsledků	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Druhy dřevin tvořících HHL
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	33°34	69°31	<i>Juniperus excelsa</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°03	69°54	<i>Betula utilis, Abies pindrow, Pinus walichiana, Picea smithiana, Juniperus excelsa</i>
4400	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°52	71°06	<i>Juniperus excelsa</i>
3850	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°57	72°15	<i>Salix</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	36°13	71°58	<i>Juniperus excelsa</i>
4050	Schickoff in Broll, Keplin 2005	36°31	72°38	<i>Juniperus excelsa</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°05	69°50	<i>Juniperus excelsa</i>
3800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°54	73°39	<i>Betula, Salix, juniperus</i>
3700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°08	74°02	<i>Betula utilis, Pinus walichiana</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°16	74°27	<i>Juniperus excelsa, Juniperus turkestanica</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°12	74°40	<i>Juniperus excelsa, Juniperus turkestanica</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	36°35	74°58	<i>Juniperus excelsa, Juniperus turkestanica</i>
3980	Schickoff in Broll, Keplin 2005	36°44	74°35	<i>Juniperus excelsa, Juniperus turkestanica</i>
3980	Schickoff in Broll, Keplin 2005	36°50	74°17	<i>Juniperus excelsa, Juniperus turkestanica</i>
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	36°20	74°50	<i>Juniperus excelsa, Juniperus turkestanica</i>
4350	Schickoff in Broll, Keplin 2005	36°10	75°03	<i>Juniperus excelsa, Juniperus turkestanica</i>
4320	Schickoff in Broll, Keplin 2005	36°38	74°37	<i>Betula utilis, Salix</i>
3700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	38°53	74°20	<i>Juniperus pseudosabina, Picea schrenkiana</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	33°48	75°50	<i>Rhododendron campanulatum, Abies pindrow, Salix, Juniperus, Pinus wallichiana, Betula utilis</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	32°55	75°40	<i>Rhododendron campanulatum, Abies pindrow, Salix, Juniperus, Pinus wallichiana, Betula utilis</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°17	75°24	<i>Rhododendron campanulatum, Abies pindrow, Salix, Juniperus, Pinus wallichiana, Betula utilis</i>

Nadmořská výška	Rok publikace výsledků	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Druhy dřevin tvořících HHL
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°09	75°16	<i>Rhododendron campanulatum, Abies pindrow, Salix, Juniperus, Pinus wallichiana, Betula utilis</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°10	75°01	<i>Rhododendron campanulatum, Abies pindrow, Salix, Juniperus, Pinus wallichiana, Betula utilis</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°15	75°	<i>Rhododendron campanulatum, Abies pindrow, Salix, Juniperus, Pinus wallichiana, Betula utilis</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°56	75°05	<i>Rhododendron campanulatum, Abies pindrow, Salix, Juniperus, Pinus wallichiana, Betula utilis</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°29	74°38	<i>Rhododendron campanulatum, Abies pindrow, Salix, Juniperus, Pinus wallichiana, Betula utilis</i>
3700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°44	74°57	<i>Rhododendron campanulatum, Abies pindrow, Salix, Juniperus, Pinus wallichiana, Betula utilis</i>
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°31	76°24	<i>Betula utilis, Sorbus tianshanica</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°46	76°13	<i>Juniperus</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°50	75°4	<i>Juniperus excelsa, Salix karelinii</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	35°07	75°33	<i>Betula utilis</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	32°01	77°25	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum, Sorbus aucuparia, Salix spp.</i>
3600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	32°19	76°51	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum, Sorbus aucuparia, Salix spp.</i>
3700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	32°12	77°09	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum, Sorbus aucuparia, Salix spp.</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	32°40	77°	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum, Juniperus spp.</i>
3800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	33°30	76°15	<i>Juniperus excelsa</i>
3900	Schickoff in Broll, Keplin 2005	32°58	77°02	<i>Juniperus excelsa</i>
3900	Schickoff in Broll, Keplin 2005	34°23	77°40	<i>Juniperus excelsa</i>

Nadmořská výška	Rok publikace výsledků	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Druhy dřevin tvořících HHL
3800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	31°15	78°19	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i> s příměsí <i>Abies pindrow</i> , <i>Juniperus recurva</i> , <i>Pyrus foliolosa</i> , <i>Betula alnoides</i> , <i>Rhododendron arboreum</i> , <i>Rhododendron barbatum</i> , <i>Sorbus</i> , <i>Quercus semecarpifolia</i>
3800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	31°03	78°28	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i> s příměsí <i>Abies pindrow</i> , <i>Juniperus recurva</i> , <i>Pyrus foliolosa</i> , <i>Betula alnoides</i> , <i>Rhododendron arboreum</i> , <i>Rhododendron barbatum</i> , <i>Sorbus</i> , <i>Quercus semecarpifolia</i>
3800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°41	79°33	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i> s příměsí <i>Abies pindrow</i> , <i>Juniperus recurva</i> , <i>Pyrus foliolosa</i> , <i>Betula alnoides</i> , <i>Rhododendron arboreum</i> , <i>Rhododendron barbatum</i> , <i>Sorbus</i> , <i>Quercus semecarpifolia</i>
3800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°17	79°40	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i> s příměsí <i>Abies pindrow</i> , <i>Juniperus recurva</i> , <i>Pyrus foliolosa</i> , <i>Betula alnoides</i> , <i>Rhododendron arboreum</i> , <i>Rhododendron barbatum</i> , <i>Sorbus</i> , <i>Quercus semecarpifolia</i>
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°55	78°52	<i>Betula utilis</i>
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	31°11	78°13	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i>
4250	Schickoff in Broll, Keplin 2005	31°06	78°58	<i>Juniperus</i>
4100	Miehe (2000)	28°36	83°37	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i>
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°45	83°40	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i>
4400	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°43	83°45	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i>
4300	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°43	83°59	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i>
4500	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°40	83°56	<i>Betula utilis</i> , <i>Rhododendron campanulatum</i> , <i>Salix</i> , <i>Juniperus</i>
4150	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°45	83°45	<i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus indica</i>
4150	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°54	83°38	<i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus indica</i>
4500	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°50	83°15	<i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus indica</i>

Nadmořská výška	Rok publikace výsledků	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Druhy dřevin tvořících HHL
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°17	82°55	<i>Betula utilis, Pinus wallichiana</i>
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°39	82°40	<i>Betula utilis, Juniperus wallichiana, Rhododendron campanulatum, Juniperus indica</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°04	82°05	<i>Betula utilis, Juniperus wallichiana, Rhododendron campanulatum, Juniperus indica</i>
3700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°55	85°44	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum</i>
3700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°56	85°41	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum</i>
4020	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°05	85°35	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum, Rhododendron barbatum, Larix griffithiana, Juniperus</i>
3930	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°33	85°05	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum, Rhododendron barbatum, Larix griffithiana, Juniperus</i>
4540	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°12	85°38	<i>Juniperus recurva</i>
4500	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°23	85°15	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum, Salix microphylla</i>
4300	Miehe (2000)	28°32	85°16	<i>Lonicera obovata, Rhododendron campanulatum, Salix microphylla</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°40	86°30	<i>Rhododendron campanulatum, Rhododendron lanatum, Juniperus indica, betula utilis</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°54	86°35	<i>Juniperus recurva, Betula utilis</i>
3900	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°49	86°47	<i>Betula, Abies, Rhododendron</i>
4300	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°52	86°48	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum, Sorbus microphylla</i>
4400	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°52	86°49	<i>Betula utilis, Rhododendron campanulatum, Sorbus microphylla</i>
4500	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°49	87°05	<i>Rhododendron campanulatum, Salix spp., Juniperus spp.</i>
3700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	26°31 – 27°31	87°59-88°53	<i>Abies densa, Betula utilis, Arundinaria aristata, Rhododendron campanulatum</i>

Nadmořská výška	Rok publikace výsledků	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Druhy dřevin tvořících HHL
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°20	88°10	<i>Rhododendron campanulatum, Rhododendron wightii, Rhododendron lanatum, Rhododendron molle</i>
3800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°25	88°46	<i>Abies, Rhododendron spp.</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°45	88°10	<i>Rhododendron campanulatum, Rhododendron wightii, Juniperus spec.</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°54	88°34	<i>Juniperus spec.</i>
4500	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°47	88°21	<i>Juniperus</i>
3900	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°44	89°05	<i>Rhododendron spp., Betula utilis, Juniperus spp., Salix spp.</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°17	90°29	<i>Rhododendron spp., Abies spec., Juniperus spec.</i>
4250	Miehe (2000)	27°23	90°42	<i>Rhododendron spp., Abies densa</i>
4400	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°40	90°	<i>Rhododendron campanulatum, Rhododendron cinnabarium, Juniperus recurva</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°43	89°15	<i>Rhododendron spp., Betula utilis</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°30	90°35	<i>Rhododendron spp.</i>
3800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°55	91°31	<i>Rhododendron spp., Abies densa</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°54	91°32	<i>Rhododendron spp., Abies densa</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°35	92°08	<i>Rhododendron spp., Abies densa, Picea, Arundinaria</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°25	92°02	<i>Rhododendron spp., Abies densa, Picea, Arundinaria</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°43	93°23	<i>Rhododendron spp., salix</i>
4650	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°58	90°28	<i>Juniperus spp.</i>
4600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°16	91°57	<i>Juniperus spp.</i>
4800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°20	90°	<i>Juniperus spp.</i>
4600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°47	91°06	<i>Juniperus spp.</i>
4600	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°07	92°08	<i>Juniperus spp.</i>
4750	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°18	91°31	<i>Juniperus spp.</i>
4280	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°22	90°51	<i>Juniperus spp.</i>
3900	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°50	97°25	<i>Rhododendron spp.</i>

Nadmořská výška	Rok publikace výsledků	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Druhy dřevin tvořících HHL
3900	Schickoff in Broll, Keplin 2005	26°15	98°19	<i>Rhododendron</i> spp.
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°08	97°22	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Abies delavayi</i> , <i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus</i> spp. <i>Salix</i> , <i>Prunus</i> spp.
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°27	97°57	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Abies delavayi</i> , <i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus</i> spp. <i>Salix</i> , <i>Prunus</i> spp.
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°03	97°05	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Juniperus</i> spp., <i>Abies densa</i>
3900	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°12	97°10	<i>Abies delavayi</i> , <i>Rhododendron</i> spp.
4250	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°30	96°20	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Abies delavayi</i> , <i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus</i> spp. <i>Salix</i> , <i>Prunus</i> spp.
4250	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°57	97°05	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Larix griffithiana</i> , <i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus</i> spp., <i>Picea balfouriana</i> , <i>Picea likiangensis</i> , <i>Abies delavayi</i>
4250	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°10	97°20	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Larix griffithiana</i> , <i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus</i> spp., <i>Picea balfouriana</i> , <i>Picea likiangensis</i> , <i>Abies delavayi</i>
3900	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°30	96°47	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Larix griffithiana</i> , <i>Betula utilis</i> , <i>Juniperus</i> spp., <i>Picea balfouriana</i> , <i>Picea likiangensis</i> , <i>Abies delavayi</i>
4650	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°53	94°53	<i>Juniperus</i> spp., <i>Rhododendron</i> spp., <i>Abies delavayi</i>
4300	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°50	95°24	<i>Abies</i> , <i>Larix griffithiana</i>
4050	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°47	95°42	<i>Abies</i> , <i>Larix griffithiana</i>
4300	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°35	94°46	<i>Abies delavayi</i> , <i>Juniperus spec.</i>
4720	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°03	93°59	<i>Juniperus tibetica</i>
4500	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°40	93°15	<i>Juniperus</i> spp.
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°04	93°57	<i>Juniperus</i> spp., <i>Abies georgii</i> , <i>Betula utilis</i> , <i>Larix griffithiana</i>
4700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	31°05	96°57	<i>Picea balfouriana</i> , <i>Juniperus tibetica</i>
4400	Schickoff in Broll, Keplin 2005	31°14	96°29	<i>Picea balfouriana</i> , <i>Juniperus spec.</i>
4300	Schickoff in Broll, Keplin 2005	31°09	94°50	<i>Picea balfouriana</i> , <i>Juniperus spec.</i>
4500	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°40	98°31	<i>Picea balfouriana</i> , <i>Rhododendron</i> spp., <i>Betula cylindrostachya</i> , <i>Picea likiangensis</i>

Nadmořská výška	Rok publikace výsledků	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Druhy dřevin tvořících HHL
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°	98°29	<i>Abies forretii</i> , <i>Rhododendron</i> spp., <i>Arundinaria melanostachya</i>
4300	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°01	98°45	<i>Abies forretii</i> , <i>Rhododendron</i> spp., <i>Salix</i> spp.
4300	Schickoff in Broll, Keplin 2005	27°58	98°43	<i>Abies forretii</i> , <i>Rhododendron</i> spp., <i>Arundinaria melanostachya</i>
3800	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°28	98°36	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Betula utilis</i>
4100	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°08	99°07	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Picea spec.</i> , <i>Abies spec.</i>
4700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	28°30	100	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Picea spec.</i> , <i>Abies spec.</i> , <i>Larix potanini</i>
4700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°55	99°40	<i>Abies delavayi</i> , <i>Sorbus vilmorini</i>
4700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	32°07	98°51	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Picea spec.</i> , <i>Abies spec.</i> , <i>Larix potanini</i>
4350	Schickoff in Broll, Keplin 2005	31°49	99°08	<i>Picea balfouriana</i>
4350	Schickoff in Broll, Keplin 2005	31°58	98°51	<i>Picea balfouriana</i>
4500	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°20	99°33	<i>Juniperus spec.</i>
4700	Schickoff in Broll, Keplin 2005	30°30	100°	<i>Juniperus spec.</i> , <i>Picea retroflexa</i>
4000	Schickoff in Broll, Keplin 2005	29°42	102°06	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Abies faxoniana</i> , <i>Betula utilis</i>
4200	Schickoff in Broll, Keplin 2005	33°08	103°56	<i>Rhododendron</i> spp., <i>Abies faxoniana</i> , <i>Betula utilis</i>
3500	Google Earth	38°18	100°42	-
3985	Google Earth	39°7	98°13	-
3651	Google Earth	37°52	101°14	-
3124	Google Earth	26°59	98°29	-

Příloha 2: Základní teplotní charakteristiky vztahující se k vegetačnímu období vypočtené na základě 74 vybraných bodů (vlastní výpočty)

Bod	X	Y	Nadmořská výška HHL (m n. m.)	Teplota nejtepl ejšího měsíce (°C)	M3	M4	M5	Počet dní s teplot ou nad 5°C
1	34,06°	69,52°	3600	13,376	12,656	11,891	11	171
2	34,05°	69,9°	3600	13,598	13,418	12,653	11,978	181
3	35,87°	71,1°	4400	8,582	7,682	7,097	5,882	104
4	35,95°	72,25°	3850	15,962	14,882	14,207	13,046	195
5	36,22°	71,97°	4000	15,062	13,982	13,307	12,146	191
6	36,52°	72,63°	4050	12,812	11,912	11,192	10,004	146
7	35,08°	69,83°	4000	10,838	10,118	9,218	8,246	134
8	34,9°	73,65°	3800	11,858	11,138	10,508	9,59	166
9	38,88°	74,33°	3700	14,582	13,142	12,287	11,126	175
10	33,8°	75,83°	3600	18,59	17,51	16,97	15,782	213
11	32,92°	75,67°	3600	11,24	11,06	10,565	9,944	177
12	35,28°	75,4°	3600	15,032	13,592	12,872	11,684	173
13	34,15°	75,27°	3600	14,948	14,048	13,463	12,356	168
14	34,17°	75,02°	3600	12,422	11,702	11,072	10,154	167
15	34,25°	75°	3600	14,492	13,412	12,872	11,792	186
16	34,93°	75,08°	3600	14,096	13,196	12,611	11,396	177
17	35,12°	75,55°	4200	11,192	9,752	9,167	7,844	136
18	32,02°	77,42°	3600	14,414	13,694	13,199	12,362	188
19	32,32°	76,85°	3600	16,766	16,046	15,551	14,714	208
20	32,2°	77,15°	3700	9,746	9,746	9,206	8,882	181
21	32,67°	77°	4200	13,166	12,446	11,951	11,114	195
22	30,68°	79,55°	3800	10,4	10,04	9,59	8,996	175
23	30,28°	79,67°	3800	10,4	10,04	9,59	8,996	175
24	30,92°	78,87°	4100	13,736	13,196	12,656	12,008	193
25	31,18°	78,22°	4100	5,516	5,876	5,381	5,408	102
26	31,1°	78,97°	4250	12,836	12,296	11,756	11,108	184
27	28,6°	83,62°	4100	5,558	5,378	5,153	4,91	80
28	28,9°	83,63°	4150	8,522	7,982	7,577	6,794	91
29	28,83°	83,25°	4500	6,026	5,486	5,081	4,298	67

Bod	X	Y	Nadmo řská výška HHL (m n. m.)	Teplota nejtepl ejšího měsíce (°C)	M3	M4	M5	Počet dní s teplot ou nad 5°C
30	29,28°	82,92°	4200	10,322	9,422	8,837	7,946	138
31	29,65°	82,67°	4100	7,544	7,004	6,464	5,708	101
32	30,07°	82,08°	4200	8,288	7,568	7,073	6,236	112
33	27,92°	85,73°	3700	8,42	8,06	7,745	7,34	150
34	27,93°	85,68°	3700	8,42	8,06	7,745	7,34	150
35	28,08°	85,58°	4020	6,5	6,14	5,825	5,42	96
36	27,67°	86,5°	4000	5,078	5,078	4,808	4,43	57
37	27,9°	86,58°	4200	10,79	10,43	9,98	9,17	157
38	27,82°	86,78°	3900	10,154	9,614	9,209	8,426	150
39	27,87°	86,8°	4300	7,754	7,214	6,809	6,026	107
40	27,87°	86,82°	4400	7,154	6,614	6,209	5,426	96
41	27,82°	87,08°	4500	6,554	6,014	5,609	4,826	83
42	27,28°	90,48°	4000	9,086	9,086	8,816	8,33	176
43	27,38°	90,7°	4250	7,586	7,586	7,316	6,83	144
44	27,67°	90°	4400	6,554	6,554	6,419	6,014	139
45	27,72°	89,25°	4000	7,106	7,106	6,836	6,35	131
46	27,5°	90,58°	4000	9,086	9,086	8,816	8,33	177
47	27,92°	91,52°	3800	15,71	15,71	15,305	14,738	215
48	27,9°	91,53°	4000	14,51	14,51	14,105	13,538	211
49	27,58°	92,13°	4000	8,42	8,42	8,15	7,664	149
50	28,13°	97,37°	4100	7,64	7,46	7,1	6,668	136
51	28,45°	97,95°	4100	6,836	6,656	6,296	5,648	120
52	28,05°	97,08°	4000	10,844	10,844	10,574	10,196	193
53	28,2°	97,17°	3900	11,444	11,444	11,174	10,796	202
54	28,5°	96,33°	4250	6,734	6,554	6,329	5,762	131
55	28,95°	97,08°	4250	6,236	5,876	5,561	4,94	85
56	30,05°	93,98°	4720	7,826	7,286	6,881	6,098	109
57	30,67°	93,25°	4500	11,192	10,472	9,977	9,14	153
58	29,01°	93,95°	4200	8,51	7,97	7,565	6,89	108
59	31,08°	96,95°	4700	4,364	3,644	3,284	2,528	0
60	31,23°	96,48°	4400	6,686	5,966	5,606	4,85	83
61	31,15°	94,83°	4300	11,066	10,346	9,851	9,014	153

Bod	X	Y	Nadmo řská výška HHL (m n. m.)	Teplota nejtepl ejšího měsíce (°C)	M3	M4	M5	Počet dní s teplot ou nad 5°C
62	29,67°	98,52°	4500	8,714	8,174	7,769	7,094	108
63	28°	98,48°	4100	7,322	7,142	6,782	6,242	92
64	28,02°	98,75°	4300	6,122	5,942	5,582	5,042	91
65	27,97°	98,72°	4300	6,122	5,942	5,582	5,042	91
66	31,96°	98,85°	4350	10,016	9,296	8,801	8,18	148
67	30,33°	99,55°	4500	10,214	9,674	9,269	8,81	151
68	30,5°	100°	4700	6,86	6,5	6,05	5,564	101
69	29,7°	102,1°	4000	8,06	7,16	6,575	6,116	117
70	33,13°	103,13°	4200	8,726	7,826	7,241	6,566	122
71	38,3°	100,7°	3500	7,052	6,152	5,162	4,352	72
72	39,13°	98,22°	3985	4,652	3,572	2,492	1,628	0
73	37,87°	101,23°	3651	8,072	6,992	6,047	5,264	91
74	26,99°	98,48°	4241	3,362	3,362	3,092	2,606	0

Příloha 3: Vztah klimatických dat na HHL k její nadmořské výšce (Schickhoff in Broll, Keplin 2005)

Stanice	Nadmořská výška (m n. m.)	Průměrné srážky (mm)	Průměrná roční teplota (°C)	Poloha nejbližší HHL(m n. m/expozice)	Průměrná teplota nejteplejšího měsíce na HHL po extrapolaci (°C)	Průměrná teplota 4 nejteplejších měsíců po extrapolaci (°C)	Průměrná teplota nejchladnějšího měsíce (°C)	Průměrná teplota nejteplejšího měsíce (°C)
Garmashbar	3600	533	0,4	4000 (j)	11,4	8,3	-12,8	14,2
Baldihel	3900	547	-0,5	4000 (J)	11,5	9,1	-12,9	12,2
Karimabad	2300	137	11,2	4000 (J)	10	8,1	-0,6	21,9
Naltar	2880	358	6	3800(S)	11,5	9,1	-6,3	17,9
Damé High	3780	546	1,1	3750(S)	13,2	11	-10,7	13
Skardu	2181	208	11,5	4000(J)	11,4	9,3	-2,9	24,1
Astore	2166	576	9,7	3800(S)	11,3	9,4	-2,3	21,1
Dras	3066	651	1,8	3700(S)	13,2	10,7	-15,7	17
Battakundi	2670	1010	8	3750(S)	12,4	10	-1,6	18,9
Naran	2362	1210	9,2	3650(S)	11,3	10,2	-1,2	19
Kalam	2290	900	10,8	3700(S)	11,5	10,3	-0,1	20
Lokpal	4267	2179	-0,8	4000(S)	8,7	7,5	-9,6	7,1
Jomosom	2744	260	11,7	4400(S)	9,5	8,9	3,8	18,6
Sermathang	2625	3880	10,9	3700(S)	10	9,4	4,1	15,9
Tengboche	3857	1032	3,7	4300(S)	7	6	-3,8	9,4
Darjeeling	2128	2601	12,9	3700(S)	11,1	10,8	6,1	17,1
Lachen	2697	1741	9,3	4100(S)	7,9	6,6	2,7	15,6
Yadong	4300	408	0	4000(S)	9,5	8,7	-8,9	7,7
Damxung	4200	502	1	4300(J)	9,9	8,8	-10,8	10,6

Stanice	Nadmořská výška (m n. m.)	Průměrné srážky (mm)	Průměrná roční teplota (°C)	Poloha nejbližší HHL(m n. m/expozice)	Průměrná teplota nejteplejšího měsíce na HHL po extrapolaci (°C)	Průměrná teplota 4 nejteplejších měsíců po extrapolaci (°C)	Průměrná teplota nejchladnějšího měsíce (°C)	Průměrná teplota nejteplejšího měsíce (°C)
Lhasa	3658	443	7,7	4600(J)	8,8	7,9	-2,1	15,5
Nagarze	4432	383	2,6	4650(J)	9,4	7,6	-5,4	10,9
Nyalam	3810	709	3,5	4300(S)	7,6	6,6	-3,9	10,5
Nedong	3552	394	8,3	4600(J)	8,4	7,4	-0,7	15,7
Nyingchi	3000	663	8,6	4400(S)	7,3	6,4	0,3	15,7
Mainling	3000	687	8,2	4300(S)	7,8	7	-0,3	15,6
Gyitang	3900	276	4,9	4400(J)	9,5	8,7	-4,6	13
Qamdo	3241	470	7,6	4500(S)	8,7	7,3	-2,4	16,2
Dege	3201	612	6,4	4350(S)	7,6	6,3	-2,8	14,5
Garze	3394	636	5,6	4350(S)	8,3	7	-4,4	14
Batang	2589	465	12,7	4500(J)	8,2	7,4	3,9	19,7
Litang	3949	722	3	4600(S)	6,6	5,6	-6	19,5
Daochen	3728	636	4	4400(S)	7,9	7,1	-5,9	11,9
Deqen	3589	664	4,8	4200(S)	8,2	7,4	-3	11,9

Příloha 4: Porovnání extrémních teplot čtyř nejteplejších (M4) a nejteplejšího (M1) měsíce na horní hranici lesa dle našich měření a dle Schickoffa (2005)

M 4				M1			
Maxima		Minima		Maxima		Minima	
ID bodu	t °C	ID bodu	t °C	ID bodu	t °C	ID bodu	t °C
10,00	16,97	35,00	5,83	10,00	18,59	44,00	6,55
19,00	15,55	41,00	5,61	19,00	16,77	41,00	6,55
47,00	15,31	60,00	5,61	4,00	15,96	35,00	6,50
4,00	14,21	64,00	5,58	47,00	15,71	55,00	6,24
48,00	14,11	65,00	5,58	5,00	15,06	64,00	6,12
13,00	13,46	55,00	5,56	12,00	15,03	65,00	6,12
5,00	13,31	25,00	5,38	13,00	14,95	29,00	6,03
18,00	13,20	71,00	5,16	9,00	14,58	27,00	5,56
12,00	12,87	27,00	5,15	48,00	14,51	25,00	5,52
15,00	12,87	29,00	5,08	15,00	14,49	36,00	5,08
24,00	12,66	36,00	4,81	18,00	14,41	72,00	4,65
2,00	12,65	59,00	3,28	16,00	14,10	59,00	4,36
16,00	12,61	74,00	3,09	24,00	13,74	74,00	3,36
9,00	12,29	72,00	2,49	2,00	13,60		
21,00	11,95			1,00	13,38		
1,00	11,89						
26,00	11,76						
6,00	11,19						
53,00	11,17						
14,00	11,07						
52,00	10,57						
11,00	10,57						
8,00	10,51						
Max. Schickoff	10,80	Min. Schickoff	6,00	Max. Schickoff	13,20	Min. Schickoff	6,60
Rozdíl zjištěných extrémních hodnot od Schickoffa	6,17		3,51		5,39		3,24