

Záverečná karta projektu

Názov projektu Evidenčné číslo projektu **APVV-17-0676****Gradienty vegetácie a zásob pôdneho uhlíka na stromovej hranici v polárnej oblasti Sibíri**Zodpovedný riešiteľ **prof. Dr. Viliam Pichler**Príjemca **Technická univerzita vo Zvolene - Lesnícka fakulta**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Technická univerzita vo Zvolene, Lesnícka fakulta

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

Ústav lesa akademika Sukačeva
Sibírske odd. Ruskej akadémie vied
Krasnojarsk
Ruská federácia

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

Patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory neboli výsledkom riešenia projektu.

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Najvýznamnejšie doposiaľ publikované práce zhrňujúce výsledky projektu:

1. Merganič, J.; Pichler, V.; Gömörýová, E.; Fleischer, P.; Homolák, M.; Merganičová, K. Modelling Impact of Site and Terrain Morphological Characteristics on Biomass of Tree Species in Putorana Region. *Plants* 2021, 10, 2722. <https://doi.org/10.3390/plants10122722> (IF = 3.935, Q1)
2. Gömörýová, E.; Pichler, V.; Merganič, J.; Fleischer, P.; Homolák, M. Changes of Soil Properties along the Altitudinal Gradients in Subarctic Mountain Landscapes of Putorana Plateau, Central Siberia. *Land* 2022, 11, 128. <https://doi.org/10.3390/land11010128> (IF = 3.398, Q1)
3. Fleischer, P.; Pichler, V.; Merganič, J.; Gömörýová, E.; Homolák, M.; Fleischer, P., Jr. Declining Growth Response of Siberian Spruce to Climate Variability on the Taiga–Tundra Border in the Putorana Mountains (Northwest Siberia). *Forests* 2022, 13, 131. <https://doi.org/10.3390/f13010131> (IF=2.634, Q1)

Uplatnenie výsledkov projektu

1. Indikátory koherencie indexov pôdneho zvetrávania v horských polohách polárnych regiónov, ktoré boli navrhnuté a overené v rámci riešenia projektu, sú spolu s ďalšími výsledkami uplatniteľné pri vývoji špecializovaných klasifikačných algoritmov (fast-and-frugal-trees) na identifikáciu polárnych oblastí, ktoré poskytujú viaceré regulačné

ekosystémové služby závislé od pôdnych procesov. Pôdy a lesotundrové ekosystémy svahových polôh Stredosibírskej plošiny prispievajú k zmierneniu globálnej zmeny klímy dvojakým spôsobom, t.j. sekvestráciou atmosferického a pôdneho organického uhlíka. Výsledky riešenia projektu korigujú generalizované predikcie negatívneho vplyvu expanzie hranice lesa v polárnych oblastiach na sekvestráciu uhlíka, z ktorých vychádzajú viaceré práce iných autorov. Komparácia vlastných poznatkov z výskumu na Putoranskej plošine s našimi predchádzajúcimi výsledkami z porovnateľných lesotundrových ekosystémov v Laponsku, severnom Yukone a SZ Teritóriu (Kanada) ukázala, že v prípade priaznivých podmienok pre zvetrávanie niektorých silikátových hornín (napr. bazaltov) je vysoko pravdepodobné, že expanzia lesotundry nezníži, ale potenciálne zvýši zásoby pôdneho uhlíka vďaka vysokej adsorpčnej a stabilizačnej kapacite produktov pôdneho zvetrávania, predovšetkým vďaka prítomnosti reaktívnych pedogénnych minerálov Al a Fe, prípadne hliníkom substituovaných pedogénnych oxidov a hydroxidov železa. Dynamiku hornej hranice lesa je na základe týchto poznatkov a potrieb možné regulovať využívaním domestikovaných kopytníkov polárnych oblastí, t. j. najmä sobov, resp. ovplyvňovaním potravinovej ekológie a migrácie divokých populácií, schopných spomaliť, alebo celkom zastaviť postup lesotundry.

2. Stanovištné snímky lesotundry a tajgy, získané a vyhodnotené počas riešenia projektu, sú využiteľné pri navrhovaní modelov lesa na hornej hranici lesa a pod ňou v podmienkach extrateritoriálnej tajgy, napr. vo Vysokých Tatrách, aby sa zvýšila ich odolnosť a reziliencia voči disturbanciám, predovšetkým vetrovým kalamitám. Údaje z Putoranskej plošiny, kde lesy čelia padavému severnému vetru, podobne ako vo V. Tatrách, ukázali, že voľný zápoj a zmesi edifikátorov (smrek, smrekovec) a pionierskych drevín významne podporujú schopnosť porastov odolávať rýchlostiam vetra porovnateľným s rýchlosťami tatranskej bóry.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

1. Reliéf terénu je popri nadmorskej výške hlavným determinantom hornej hranice lesa a stromovej biomasy pozdĺž najsevernejšieho výbežku lesného biómu v oblasti Putoranskej plošiny (Cieľ 1); namiesto vzostupu hranice lesa, ktorý je limitovaný zosuvmi zvetrávajúceho materiálu a severným katabatickým prúdením, dochádza pôsobením častých teplotných inverzií k relatívnemu rastu zásoby biomasy pod hornou hranicou lesa; predpokladaná dominancia a rozhodujúci, resp. limitujúci vplyv nadmorskej výšky ako ekologického faktora neboli vo výškovom rozpätí pásma tajgy a lesotundry (od 100 do ca 500 m n.m. potvrdené), určujúca bola jej interakcia so sklonom, polohou na svahu, resp. s mikro- a mezoreliéfom.

2. Podobne, terénny reliéf a predovšetkým sklon boli prekvapivo určujúcim faktorom obsahu pôdneho uhlíka, pričom tento vplyv je sprostredkovaný hrúbkou povrchovej vrstvy organického materiálu s tepelno-izolačnými vlastnosťami (Cieľ 2); táto vrstva zhoršuje podmienky pôdneho zvetrávania, limituje obsah pedogénnych minerálov Fe a Al a tým redukuje disponibilitu aktívnych povrchov pre adsorpciu organického uhlíka, primárne tam, kde prebehla substitúcia železa hliníkom; hrúbka povrchovej vrstvy organického materiálu svojim tepelno-izolačným účinkom prekryla vplyv nadzemnej biomasy na obsah organického uhlíka.

3. Kvalita organickej hmoty, reprezentovaná obsahom stabilného izotopu ^{15}N , ale aj pomerom C/N v hlbších vrstvách pôdy, korelovala s nadzemnou biomasou; zároveň obsah organického uhlíka priaznivo ovplyvňoval stromovú zložku prostredníctvom moderovania vlhkostného režimu, zlepšovania nutričného potenciálu pôdy a podpory vegetačného krytu, čím sa zároveň zvyšovala odolnosť proti erózii – vodnej aj mimoriadne intenzívnej vetrovej erózii a vyvievaniu (Cieľ 3);

4. Množstvo organického uhlíka v pôdach lesotundrových ekosystémov Putorany bolo porovnateľné a vyššie ako v pôdach zo amfibolitických svahovín pod laponskou lesotundrou, a porovnateľné, resp. nižšie ako pod lesotundrou na vápenatých a čiernych bridliciach severného Yukonu (Cieľ 4); zároveň sme však pri analýze indikátorov pôdneho zvetrávania zistili, že pôdy Putorany viažu nielen pôdny uhlík stabilizáciou na minerálnej zložke pôdy, ale tiež atmosferický CO_2 v procese pôdneho zvetrávania, ako ukázali pomery Ca/Na, resp. Mg/Na; obsah pôdneho uhlíka a oba indikátory boli silne korelované, čo ukazuje súčasné plnenie dvoch ekosystémových funkcií na rozdiel od pôd na kanadských a laponských lokalitách;

5. Spoločným faktorom limitujúcim existenciu trvalo zapojených lesov Putorany a Vysokých Tatier sú víchrice, ktoré majú na území Putorany často charakter katabatického vetra, zatiaľ čo vo Vysokých Tatrách sa jedná o bôru, t. j. v oboch prípadoch o padavý vietor s potenciálne ničivými účinkami na lesy najmä v miestach nárazu vzduchových mäs na menej sklonitý terén; lesotundrové porastové štruktúry Putorany môžu byť úspešne napodobnené v podmienkach tzv. extrateritoriálnej tajgy Vysokých Tatier na základe modelov vypracovaných na základe vlastných výsledkov dendro- a biometrických meraní vhodnou kombináciou cielenej intervencie a ponechaním porastov na samovývoj, t. j. prechodom na prírodnú dynamiku (Cieľ 6);
6. Stanovištné snímky a porastové modely získané na hornej hranici lesa na svahoch Putoranskej plošiny po disturbanciách rôzneho typu predstavujú v rozličnej miere analóg stavu pri narušení hornej hranice lesa vo vysokých pohoriach Karpát; na základe podobnosti možno odporúčať, aby modely lesa v na a aj hlbšie pod hornou hranicou lesa podmienkach obsahovali najmenej dva edifikátory (smrek, smrekovec) a 3–4 druhy listnatých drevín (breza, vŕba, jelša), v porastoch s nezapojenou alebo len slabozapojenou korunovou vrstvou, siahajúcich od hornej hranice lesa do hĺbky porastu; takáto disipatívna štruktúra a textúra porastov vykazuje vysokú mieru reziliencie voči disturbanciám (Cieľ 6).
7. Doterajšie závery o vplyve lesa a expanzie hranice lesa v polárnych oblastiach na sekvestráciu uhlíka, obsiahnuté vo viacerých prácach iných autorov, sa nemôžu zovšeobecňovať; komparácia vlastných poznatkov z výskumu na Putoranskej plošine s prechádzajúcimi našimi výsledkami z porovnateľných lesotundrových ekosystémov v Laponsku, severnom Yukone a SZ Teritóriu (Kanada) ukázala, že v prípade priaznivých podmienok pre zvetrávanie viacerých silikátových hornín (napr. bazalty) je vysoko pravdepodobné, že expanzia lesotundry nemusí znížiť, ale môže zvýšiť zásoby pôdneho C vďaka vysokej stabilizačnej kapacite produktov pôdneho zvetrávania, predovšetkým za prítomnosti reaktívnych pedogénnych minerálov Al a Fe, prípadne Al substituovaných pedogénnych Fe oxidov a hydroxidov.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

1. The terrain relief is, in addition to altitude, the main determinant of tree biomass at the upper forest boundary in the mountains of the polar regions on the landscape scale (Objective 1); the influence of altitude is modified or reversed by frequent temperature inversions in mountain valleys, on the slopes of which the upper forest border runs; the limiting effect of altitude as the overriding ecological factor was not confirmed in the range from 100 m to about 500 m above sea level. Instead, its influence was modified by interactions with the slope position, as well as micro- and mesorelief. 2. Similarly, the terrain relief and, in particular, the slope angle were the determining factors of the soil carbon content; their influence was mediated by the thickness of the surface layer of the organic material with heat-insulating properties (Objective 2); this layer worsens the conditions of soil weathering, limits the content of pedogenic minerals Fe and Al and thus the availability of active surfaces for the adsorption of organic carbon, directly on the surfaces where the substitution of iron with aluminum has taken place; the thickness of the surface layer of organic material with its thermal insulating effect covered the influence of above-ground biomass on the organic carbon content. 3. The quality of organic matter, represented by the content of the stable isotope ^{15}N , but also by the C / N ratio in the deeper soil layers, correlated with aboveground biomass; at the same time, the organic carbon content had a positive effect on the tree component by moderating the moisture regime, improving the nutritional potential of the soil and supporting vegetation cover, thus increasing erosion resistance - both water and wind (Objective 3). 4. The amount of organic carbon in the soils of the Putorana forest-tundra ecosystems was comparable and higher than in the soils from the amphibolitic slope deposits below the Lapland forest tundra, and comparable, resp. lower than under forest tundra on the calcareous shales of the northern Yukon (Objective 4); At the same time, however, when analyzing soil weathering indicators, we found that Putorana soils bind not only soil carbon by stabilization on the soil mineral matrix, but also atmospheric CO_2 via soil weathering, as shown by Ca / Na ratios, resp. Mg / Na; soil carbon content and both indicators were strongly correlated, indicating the simultaneous fulfillment of two ecosystem functions as opposed to soils in Canadian and Lapland localities. 5. A common factor limiting the existence of the permanently involved forests of Putorana and

the High Tatras is the storms, which often have the character of catabatic winds in the territory of Putorana, while in the High Tatras it is bora, i.e., in both cases, a downwind with potentially devastating effects on forests, especially at the point of impact of air masses on less sloping terrain; Putorana forest-forest stand structures can be successfully imitated in the conditions of the so-called the extraterritorial taiga of the High Tatras based on models developed using the results of dendro- and biometric measurements. A suitable combination of natural dynamics and selected intervention can be applied to that end (Objective 6). 6. Stand characteristics recorded at the upper forest boundary on the slopes of the Putor Plateau after various disturbances are partly analogous to those at disturbed sites in the high Carpathian Mountains; by analogy, it can be recommended that forest models in such conditions contain at least two edifiers (spruce, spruce) and 3-4 species of deciduous trees (birch, willow, alder), optimally without closed canopy; such a dissipative structure and texture of the stands shows a high degree of resistance and resilience to disturbances (Objective 6). 7. It can be stated that the previous conclusions on the impact of the forest and the expansion of the forest border in the polar regions on carbon sequestration, contained in several works by other authors, cannot be generalized; A comparison of our research findings on the Putoran Plateau with our previous results from comparable forest-tundra ecosystems in Lapland, northern Yukon and the NW Territory (Canada) has shown that forest expansion under favorable conditions for weathering of silicate rocks (eg basalts) may not reduce but maintain or increase soil carbon stocks due to the high adsorption and stabilization capacity of soil weathering products, mainly due to the presence of reactive pedogenic Al and Fe minerals, or aluminum substituted pedogenic iron oxides and hydroxides. The upper limit of open-canopied forest tundra, composed of several tree species (edifiers and so-called pioneer species) provides other important ecosystem services owing to their resistance and resilience to disturbances.