

STRUČNÉ POROVNANIE DVOCH MODELOV STOMATÁLNEJ VODIVOSTI OZÓNU PRE BOROVICU LIMBOVÚ

ANNA BUCHHOLCEROVÁ¹, PETER FLEISCHER JR.^{2,3}

¹ Slovenská akadémia vied, Ústav vied o Zemi, Ďumbierska 1, Banská Bystrica, Oddelenie fyziky atmosféry

² Technická Univerzita Zvolen, Lesnícka fakulta, T. G. Masaryka 24, Zvolen

³ Štátne lesy TANAPu, Tatranská Lomnica, Vysoké Tatry

Chamber studies have proven the adverse effect of ozone to vegetation. With regard to tropospheric ozone distribution in the atmosphere (its concentration increases along with increasing altitude), we conclude that the most endangered vegetation might be located in mountain areas enriched in ozone. In this article, two models of stomatal conductance are evaluated according to stomatal conductance gained by experiment.

Komorové štúdie poukazujú na nepriaznivý vplyv koncentrácií ozónu na vegetáciu. S ohľadom na rozloženie troposférického ozónu v atmosfére (jeho koncentrácií narastajú so zvyšujúcou sa nadmorskou výškou) usudzujeme, že vegetácia nachádzajúca sa v horských oblastiach bohatých na ozón môže byť výraznejšie ohrozená. V článku vyhodnotíme dva modely prieduchovej vodivosti borovice limbovej s experimentálne získanými hodnotami.

Key words: stomatal conductance, ozone, vegetation, Swiss pine

ÚVOD

Rastlina je otvoreným termodynamickým systémom a výmena častíc medzi ňou a prostredím sa uskutočňuje viacerými cestami. Jednou z nich je výmena plyných látok prostredníctvom prieduchov, ktorá umožňuje získavanie oxidu uhličitého potrebného na fotosyntézu z okolitého vzduchu, a obdobne vylučovanie kyslíka pri dýchaní. Intenzitu výmeny plynov popisuje stomatálna, čiže prieduchová vodivosť, ktorá je určená stupňom otvorenia prieduchovej štrbiny daným turgorom a osmotickým potenciálom. Prieduchovú vodivosť meriame porometrami a udávame ju v jednotkách $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Obyčajne sa meria pre oxid uhličitý, danú hodnotu je možné prepočítať na iné plyny (napríklad ozón).

Výskumy ohľadom toxického vplyvu vysokých koncentrácií ozónu na vegetáciu sa vykonávajú vydymovaním v skleníkoch, v komorách s otvorenou vrchnou časťou, tzv. open-top chambers (OTC) a taktiež priamo v externých podmienkach. Komory OTC sa podobajú na fóliovníky s rozdielom, že im chýba vrchná časť. Prítomné steny zabráňujú horizontálnej výmene vzduchu medzi komorou a okolím, vertikálna výmena vzduchu vplyvom použitej geometrie výrazne obmedzená nie je. V komore sa nachádza vyústenie trubice, ktorou vzduch s vopred pripraveným chemickým zložením, určený na vydymovanie, vstupuje do komory. Experimenty s vydymovaním viedli k popisu poškodení vegetácie zapríčinených pôsobením ozónu (Jäger a kol., 1993; Bergmann a kol., 1999; Manning a kol., 2002; Jurán a kol., 2021). Boli popísané zmeny v štruktúre pletív, ktoré v niektorých podmienkach viedli k poškodeniu viditeľnému voľným okom, či k poklesu produkcie rastliny. Viditeľné poškodenia na rastline sa líšia v závislosti od druhu a patria medzi ne napr. škvrny na listoch, strakatosť a bronzovanie. Názorné ukážky sú zobrazené v mobilnej aplikácii na zhromažďovanie viditeľných poškodení vyvinutej organizáciou Medzinárodného kooperatívneho programu o vplyve znečistenia vzduchu na rastlinné spoločenstvá ICP Vegetation

(Ozone app – Ozone Injury Recording App; <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/ozone-injury/record>). Problém pri určovaní poškodenia vegetácie ozónom na rozdiel napr. od ťažkých kovov spočíva v tom, že v pletivách ozón nezanecháva špecifické reziduá, ale mení sa na reaktívne oxidy kyslíka ROS. Tieto formy kyslíka reagujú s ďalšími zlúčeninami, až sa chemickou reakciou premenia do podoby, v ktorej strácajú svoje oxidačné vlastnosti. Posúdením viditeľného poškodenia ozónu na lesné druhy sa zaoberá literatúra (Schaub a kol., 2020).

Toxický vplyv ozónu na vegetáciu je zapríčinený chemickou štruktúrou ozónu, ktorá spôsobuje vysokú reaktivitu zlúčeniny, čím narušuje rastlinné pletivá. Výskum sa v tejto oblasti zaoberá najmä hospodárskymi plodinami (experimenty na pšenici, sóji a pod.) a dominantnými druhmi využívanými v drevospracujúcom priemysle. Nerovnomerné vertikálne rozloženie ozónu v atmosfére však naznačuje možné významnejšie ohrozenie vegetácie vo vyšších nadmorských výškach, a preto sa v tejto práci venujeme zástupcovi horskej vegetácie, borovici limbovej. Borovica limbová, limba (*Pinus cembra* L.), je mohutným ihličnatým stromom dosahujúcim výšku priemerne 10–12 m a dožívajúcim sa aj 1000 rokov. Ihlice na limbe vyrastajú vo zväzkoch po 5 ihlic v brachyblaste a vytrvávajú na strome 3–5 rokov. Na nepriaznivé podmienky druh reaguje citlivo prostredníctvom zmenšenia výškového prírastku. Borovica limbová je mrazuvzdorným druhom odolným voči chladu, čo dosahuje prostredníctvom zníženia obsahu vody v ihliciach v zime a nie je preto odkázaná na prítomnosť snehovej pokrývky. Na rozdiel od borovice horskej (*Pinus mugo* Turra), je limba menej citlivá na výsušné mrazivé vetry (Pagan a kol., 1999; Caudullo a kol., 2016). Limbe vyhovuje nadmorská výška od 1100 do 2500 m n.m. Na území Slovenska sa prirodzene vyskytuje na hornej hranici lesa v Západných, Vysokých a Belianskych Tatrách, pričom preferuje južné svahy (Pagan a kol. 1999).

Tabuľka 1. Charakteristika meraní stomatálnej vodivosti ozónu pre borovicu limbovú v roku 2016.

Table 1. Characteristic of ozone stomatal conductance measurements for Swiss pine in 2016.

Dátum	Počet meraní	Začiatok merania SEČ	Koniec merania SEČ	Priemerná teplota °C	Priemerná vlhkosť kPa	Priemerná intenzita žiarenia $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
16.7.2016	19	08:43	11:29	20,9	0,4	1395
9.8.2016	37	08:27	12:41	29,4	2,3	1500
13.8.2016	55	09:36	15:54	25,6	1,5	1099
14.8.2016	37	09:34	14:44	27,5	1,7	1529
1.9.2016	15	11:04	12:55	29,5	1,5	1500
3.9.2016	28	10:11	12:48	27,1	1,3	1000

Jeden zo spôsobov určovania depozície ozónu do vegetácie je prostredníctvom modelovania toku ozónu do vegetácie, pričom kľúčovou hodnotou pre jeho výpočet je prieduchová vodivosť, ktorú je možné merať napríklad prostredníctvom systému LiCOR priamo na vegetácii. V tomto článku porovnáme dva modely (Mills a kol., 2017; Bičárová a kol., 2019) na určenie stomatálnej vodivosti na meraniach, ktoré boli vykonané na borovici limbovej v roku 2016.

METODIKA

Merania prieduchovej vodivosti vodnej pary na borovici limbovej boli uskutočnené gazometrom LiCOR 6400 v štandardizovanej nepriehľadnej kuvete LiCOR 6400-22 Opaque Conifer Chamber prostredníctvom lešenia. Získané hodnoty prieduchovej vodivosti boli prepočítané konštantou 0,663 na stomatálnu vodivosť ozónu (Massman, 1998). Použitá kuveta pre ihličnaté stromy je stavaná pre vetvičky s maximálnou dĺžkou 7,5 cm a pre dĺžku ihlíc približne 3 cm. Do kuvety bola vložená koncová vetvička a vytvorený systém sa nechal približne 5 minút stabilizovať na svetelných podmienkach (s intenzitou 500 až 2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ fotosynteticky aktívneho žiarenia), ktoré boli určené vnútorným zdrojom žiarenia LiCOR 6400-18 RGB Light Source. Po stabilizácii sa odmerali hodnoty prostredia v kuvete – teplota, sýtosťný doplnok¹, relatívna vlhkosť a vlastnosti vegetácie – prieduchová vodivosť a intenzita fotosyntézy. Merania sa opakovali na ďalších vetvičkách. Vetvičky počas meraní zostali spojené so stromom, a preto boli počas merania vnútornými procesmi spojené aj s podmienkami, v ktorých sa nachádzal zvyšok stromu. Žiarenie v kuvete dosahovalo pre väčšinu meraní hodnoty typické pre jasné počasie. Základný popis meraní sa nachádza v Tab. 1.

Jarvisov multiplikatívny model výpočtu prieduchovej vodivosti je často používaný model z dôvodu svojej jednoduchosti v porovnaní s inými mechanistickými modelmi (Mills a kol., 2017). Model je určený niekoľkými modifikačnými faktormi f nadobúdajúcimi hodnoty v rozmedzí 0 až 1 a maximálnou prieduchovou vodivosťou určenou pre jednotlivé dreviny nasledovne:

$$g_{sto} = g_{max} * f_{phen} * f_{light} * \max\{f_{min}, (f_{temp} * f_{VPD} * f_{SWP})\}. \quad (1)$$

Z definície platí, že modelové hodnoty stomatálnej vodivosti nadobúdajú maximálne hodnotu g_{max} . Táto hodnota je obvyčajne určená z experimentálnych meraní, pričom jej

výber závisí od použitej metodiky a obvykle sa určí na hodnotu 80. až 95. percentilu z nameraných hodnôt, resp. z hodnôt nameraných pri optimálnych podmienkach. Modifikačné faktory použité v Jarvisovom modeli sú nasledovné: fenologický f_{phen} , teplotný f_{temp} , faktor sýtosťného doplnku f_{VPD} , faktor vlhkosti pôdy f_{SWP} , svetelný f_{light} a minimálny faktor f_{min} .

Fenologický faktor f_{phen} pre ihličnaté stromy sa obvyčajne parametrizuje hodnotou 1 pre celé trvanie vegetačného obdobia a hodnotou 0 pre ostatné obdobie. Svetelný faktor f_{light} je určený intenzitou fotosynteticky aktívneho žiarenia (PAR).

$$f_{light} = 1 - e^{-light_a PAR}. \quad (2)$$

Keď táto hodnota nie je k dispozícii, určí sa z globálneho slnečného žiarenia (Global) nasledovným spôsobom:

$$f_{light} = 1 - e^{-light_a (Global/0,486263)}, \quad (3)$$

kde $light_a$ je jedným z parametrov Jarvisovho modelu. Faktor f_{light} nadobúda hodnotu 0,9 s použitím parametra $light_a = 0,0032$ už pri intenzite fotosynteticky aktívneho žiarenia $PAR = 700 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Minimálny faktor f_{min} určuje minimálnu prieduchovú vodivosť počas vegetačného obdobia a pri dostatočnej intenzite slnečného žiarenia. Teplotný faktor f_{temp} je určený tromi parametrami, kde parametre T_{min} a T_{max} ohraničujú teplotu vzduchu, pri ktorej dochádza k otvoreniu, resp. uzatvoreniu prieduchov (Emberson a kol., 2010; Op de Beeck a kol., 2010). Optimálna teplota T_{opt} je označením pre teplotu vzduchu, počas ktorej je možné namerať maximálnu hodnotu stomatálnej vodivosti a teda popisuje optimálne podmienky pre rast vegetácie.

$$f_{temp} = \max \left[f_{min}, \left(\frac{T - T_{min}}{T_{opt} - T_{min}} \right) \left(\frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{opt}} \right)^{bt} \right], \quad (4)$$

$$bt = \frac{T_{max} - T_{opt}}{T_{opt} - T_{min}}. \quad (5)$$

Faktor vlhkosti vzduchu f_{SWP} je vyjadrený prostredníctvom sýtosťného doplnku VPD . Zvyšovaním sýtosťného doplnku sa zhoršujú podmienky pre stomatálnu vodivosť. Hodnotu VPD odvodzujeme z teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, pomocou prepočtu z napätia nasýtenia $E_{(T)}$.

$$f_{VPD} = \min \left[1, \max \left[f_{min}, \frac{(1 - f_{min})(VPD_{min} - VPD)}{(VPD_{min} - VPD_{max})} + f_{min} \right] \right] \quad (6)$$

Faktor pôdnej vlhkosti f_{SWP} sme pre horskú oblasť určili na hodnotu 1.

¹ Sýtosťný doplnok je charakteristika vlhkosti vzduchu, vyjadrujúca množstvo vodnej pary, potrebné dodať do vzduchu

pri konštantnej teplote, aby sa stal nasýteným. (<http://slovník.cmes.cz/vyklad/>).

Tabuľka 2. Parametre modifikačných faktorov pre výpočet prieduchovej vodivosti g_{sto} .

Table 2. Parameters of modification factors for stomatal conductance g_{sto} calculation.

Parameter	g_{max}	f_{min}	$light_a$	T_{min}	T_{opt}	T_{max}	VPD_{max}	VPD_{min}
Hodnota	113	0,1	0,0032	0	27	200	0,25	2,5
Jednotka	$\mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$			$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	kPa	kPa

Parametre pre Jarvisov model sme odvodili podľa najtesnejšieho vzťahu medzi nameranými a namodelovanými hodnotami prieduchovej vodivosti (určeného koeficientom determinácie), podrobný postup je uvedený v článku Buchholcerová a kol. 2019. Parametre, na ktoré nebola stomatálna vodivosť v našich meraniach citlivá, sme určili z dostupnej literatúry. Získané hodnoty sú uvedené v Tab. 2.

Merania sme vyhodnotili aj stochastickým modelom získaným metódou symbolickej regresie prostredníctvom programu Heuristic Lab verzia 3.13 (Wagner a kol., 2014). Použitý model bol získaný z rozsiahlych meraní na borovici horskej (*Pinus mugo* Turra) uskutočnených v mesiacoch jún až november meraniami v lokalitách Stará Lesná (810 m n.m.) a Skalnaté pleso (1788 m n.m.) systémom LiCOR 6400 (Bičárová a kol. 2019):

$$g_{sto} = \left(\frac{TA \cdot \log(c_0 \cdot TA + c_1) \cdot c_2}{c_3 \cdot VPD} \right) + c_4, \quad (7)$$

kde TA označuje teplotu vzduchu v jednotkách $^{\circ}\text{C}$, VPD sýtosťný doplnok v kilopaskaloch a c_0 až c_4 zodpovedajú konštantám s hodnotami: $c_0 = 1,9854$, $c_1 = -16,34$, $c_2 = 0,16571$, $c_3 = 267,39$ a $c_4 = 0,01287$. Táto rovnica poukazuje na význam teploty a sýtosťného doplnku pre určenie prieduchovej vodivosti rastlín.

VÝSLEDKY

Hodnoty troch meteorologických prvkov, vstupujúcich v podobe premenných do funkcií určujúcich hodnoty modifikačných faktorov Jarvisovho modelu (teplota, sýtosťný doplnok a intenzita žiarenia), sú zobrazené v grafoch na Obr. 1. Na grafoch sú krúžkami znázornené hodnoty meteorologických prvkov. Zodpovedajúce hodnoty relatívnej prieduchovej vodivosti sú určené nasledovným predpisom:

$$g_{sto_{rel}} = \frac{g_{sto}}{g_{max}}. \quad (8)$$

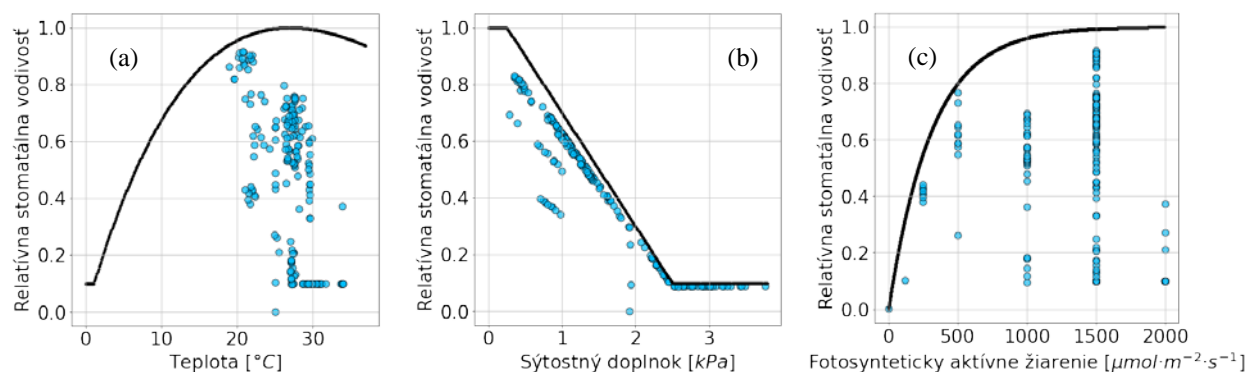
Čierne krivky zobrazujú hypotetickú maximálnu hodnotu prieduchovej vodivosti, ktorá zodpovedá danému meteorologickému prvku. Preto dané krivky sú obalovými funkciami a hodnoty sa nachádzajú v priestore vymedzenom danou krivkou a osou x. To vyjadruje súčinné pôsobenie jednotlivých modifikačných faktorov na výslednú stomatálnu vodivosť. Pre ostatné modifikačné faktory predpokladáme v priebehu meraní stabilnú hodnotu (f_{phen} , f_{SWP})

Ďalej budeme porovnávať hodnoty stomatálnej vodivosti ozónu do vegetácie pre Jarvisov a stochastický model s meraniami získanými systémom LiCOR.

Grafy na Obr. 2 a 3 zobrazujú hodnoty stomatálnej vodivosti pre bodové merania na pozadí hodnôt vypočítaných z oboch modelov pre podmienky $f_{phen} = 1$, $f_{SWP} = 1$, a $PAR = 1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Danú hladinu fotosynteticky aktívneho žiarenia sme vybrali z dôvodu najväčšieho množstva meraní pre túto hodnotu (konkrétne 126 údajov z celkového počtu 191). Os x zobrazuje teplotu vzduchu, os y sýtosťný doplnok a farebná škála zobrazuje stomatálnu vodivosť. Biela oblasť vľavo hore vo všetkých grafoch zodpovedá nerealistickým hodnotám sýtosťného doplnku, ktorý je funkciou teploty a vlhkosti vzduchu. Pozadie grafu zobrazuje výpočet Jarvisovým (Obr. 2) a stochastickým modelom (Obr. 3). Jednotlivé body označujú hodnoty namerané systémom LiCOR. V oboch modeloch vidíme vplyv sýtosťného doplnku na prieduchovú vodivosť. Pokles prieduchovej vodivosti s nárastom sýtosťného doplnku zodpovedá pozorovaným meraniam. Stochastický model lepšie popisuje práve merania s nižšími nameranými hodnotami VPD . Na druhej strane, Jarvisov model lepšie popisuje rozsah grafu pre vyššie VPD a tiež pre hodnoty VPD blízke nule, kde sa stochastický model približuje k nerealistickej hodnote $400 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$, čo je však kvôli jednotnému ohraňovaniu mierky grafu (0 až $125 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$) slabšie viditeľné. Z Obr. 1b vyplýva, že parameter $VPD_{max} = 0,25 \text{ kPa}$ by mohol byť posunutý na nižšiu hodnotu, čím by sa posu-

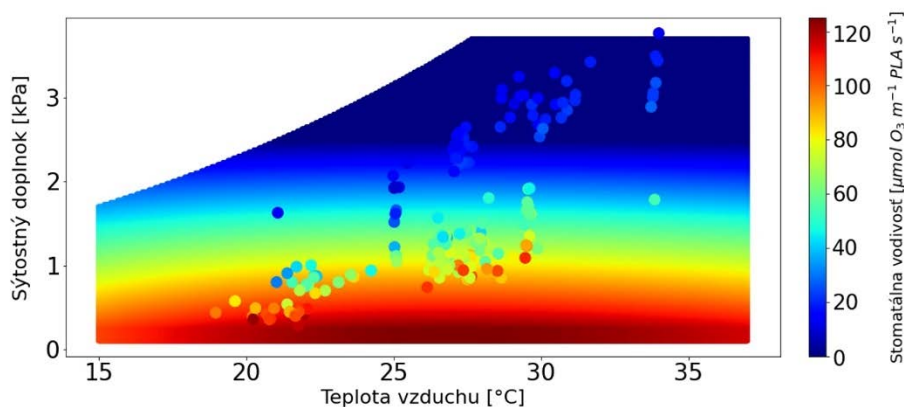
Obrázok 1. Znázornenie funkcií modifikačných faktorov teploty (a), sýtosťného doplnku (b) ako opisnej charakteristiky vlhkosti a fotosynteticky aktívneho žiarenia (c) spolu s hodnotami relatívnej stomatálnej vodivosti pre jednotlivé merania LiCOR.

Figure 1. Displaying functions of modification factors of temperature (a), vapour pressure deficit (b) as a describing humidity characteristic and photosynthesis active radiation (c) together with stomatal conductance relative values for single measurements LiCOR.



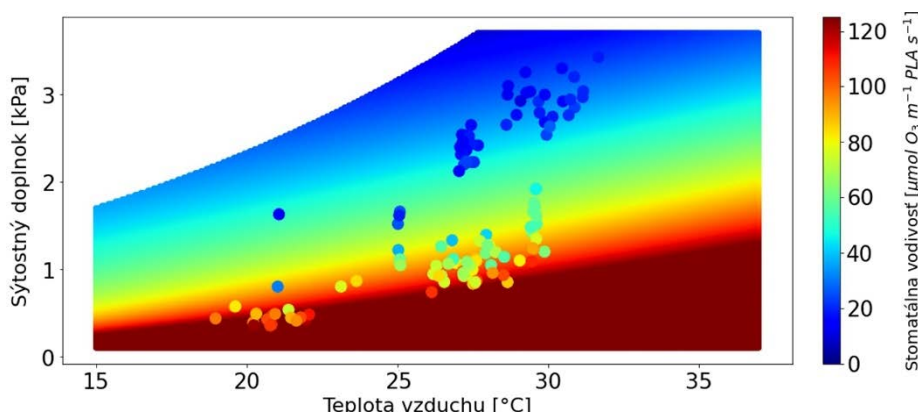
Obrázok 2.
Jarvisov model stomatálnej vodivosti v porovnaní s meraniami LiCOR.

Figure 2.
Jarvis model of stomatal conductivity in comparison with LiCOR measurements.



Obrázok 3.
Stochastický model stomatálnej vodivosti v porovnaní s meraniami LiCOR.

Figure 3.
Stochastic model of stomatal conductivity in comparison with LiCOR measurements.



nul pás modelovanej prieduchovej vodivosti v oblasti okolo $60 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$ bližšie k nameraným hodnotám.

Pri nízkych hladinách sýťostného doplnku sú hodnoty g_{sto} na Obr. 3 veľmi vysoké. Najväčšiu odlišnosť medzi stochastickým modelom a meraniami vidíme pre vyššie hodnoty sýťostného doplnku, kedy model priraduje pre jednotlivé merania vyššie prieduchové vodivosti v rozmedzí $20 - 40 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$, pričom hodnoty určené meraním boli v rozpätí 5 až $28 \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-1} \text{ PLA s}^{-1}$.

V Tab. 3 sa nachádza jednoduché porovnanie modelov. Použili sme Pearsonov korelačný koeficient, strednú kvadratickú chybu (RMSE) a rozdiel priemerných hodnôt jednotlivých súborov (BIAS).

Tabuľka 3. Porovnanie modelov pre výpočet stomatálnej vodivosti.

Table 3. Comparison of models for stomatal conductivity calculation.

	Stochastický model	Jarvisov model
Korelačný koeficient	0,937	0,916
RMSE	24,8	12,5
BIAS	-21,8	0,92

DISKUSIA

Použitý stochastický model vychádzal z meraní v Starej Lesnej na príbuznom druhu borovice, čo mohlo spôsobiť nadhodnotenie hodnôt prieduchovej vodivosti. Korelačný koeficient dosahoval vyššie hodnoty pri stochastickom

modeli ako pri Jarvisovom modeli. Výhodou daného modelu je vyššia presnosť pre najčastejšie tréňované hodnoty a možnosť vytvorenia modelu bez poznania hlbších väzieb medzi premennými. Merania prieduchovej vodivosti prostredníctvom LiCOR sú špecifické svojimi mikroklimatickými podmienkami v kuvete v blízkosti zdroja žiarenia, čo sa pravdepodobne odzrkadlilo na malom počte meraní s nižšími hodnotami sýťostného doplnku, a teda nerealistickými hodnotami prieduchovej vodivosti v stochastickom modeli. Bez kontroly však stochastický model môže udávať nerealistické hodnoty najmä pre rozsah a kombinácie vstupných premenných, pre ktoré neboli k dispozícii tréňovacie údaje. Tieto nedostatky sa dajú odstrániť vhodným doplnením umelých tréňovacích údajov. Bez tohto doplnenia je potrebné model používať vo vopred určenom rozsahu vstupných premenných.

Jarvisov multiplikatívny model popisuje údaje vo všeobecnosti realistickejšie ako predchádzajúci model. Je však náročnejší na parametrizáciu a popis vplyvu premennej na prieduchovú vodivosť nemusí byť dostatočný. Napríklad, v použitej konfigurácii parametrov je $T_{max} = 200^\circ\text{C}$, kde daná hodnota nezodpovedá reálnej maximálnej teplote vzduchu, pri ktorej ustáva výmena plynov medzi vegetáciou a prostredím, keďže tá nastáva oveľa skôr. Samotná správa Európskej hospodárskej komisie OSN UNECE (Mills a kol., 2017) však túto hodnotu schvaľuje a navrhuje ju používať pre ihličnany v miernom pásme. V danom prípade by však stála za zváženie zmena predpisu pre obaťovú krivku prislúchajúcu vplyvu teploty na stomatálnu vodivosť.

Na výpočty prieduchovej vodivosti a toku ozónu do vegetácie pomocou Jarvisovho modelu je možné použiť DO₃SE model dostupný na stránke Štokholmského environmentálneho inštitútu SEI <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/do3se-deposition-ozone-stomatal-exchange/> alebo aplikáciu vyvinutú Národným lesníckym centrom <http://www.nlcsk.sk/mapfod/>.

Tento článok vznikol vďaka podpore projektov Agentúry pre vedu a výskum APVV 21-0412 a APVV 17-0644 a projektu Vedeckej agentúry VEGA 2/0093/21.

LITERATÚRA

- Bičárová, S.–Sitková, Z.–Pavlendová, H.–Fleischer Jr., P.–Fleischer Sr., P.–Bytnerowicz, A. 2019, *The role of environmental factors in ozone uptake of pinus mugo turra. Atmospheric Pollution Research*, 10(1): 283–293.
- Buchholcerová, A.–Fleischer, Jr., P.–Štefánik, D.–Bičárová, S.–Lukasová, V., 2021, *Specification of Modified Jarvis Model Parameterization for Pinus cembra. Atmosphere*, 2021, 1, 5. <https://doi.org/10.3390/atmos1010005>.
- Caudullo, G.–de Rigo, D., 2016, *Pinus cembra in Europe: distribution, habitat, usage and threats. European Atlas of Forest Tree Species.*, pages e01bd9b+.
- Emberson, L.D.–Wieser, G.–Ashmore, M.R., *Modelling of stomatal conductance and ozone flux of Norway spruce: comparison with field data. Environmental Pollution*, 109:393–402, 2000.
- Massman, W.J., 1998, *A review of the molecular diffusivities of H₂O, CO₂, CH₄, CO, O₃, SO₂, NH₃, N₂O, NO, and NO₂ in air, O₂ and N₂ near STP. Atmospheric Environment*, 32: 1111–1127.
- Mills, G.–Harmens, H.–Hayes, F.–Pleijel, H.–Büker, P.–González-Fernández, I.–Alonso, R.–Bender, J.–Bergmann, E.–Bermejo, V.–Braun, S.–Danielsson, H.–Gerosa, G.–Grünhage, L.–Karlsson, P.E.–Marzuoli, R.–Schaub, M.–Simpson, D., 2017, *Mapping critical levels for vegetation revised chapter 3 of the manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. The International Co-operative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops.*
- Op de Beeck, M.–Löw, M.–Deckmyn, G.–Ceulemans, R., 2010, *A comparison of photosynthesis dependent stomatal models using twig cuvette field data for adult beech (fagus sylvatica l.). Agricultural and Forest Meteorology*, 150(4): 531–540.
- Pagan, J. a kolektív, 1999, *Lesnícka dendrológia. Zvolen: Technical University in Zvolen*, 2 edition.
- Wagner, S.–Kronberger, G.–Beham, A.–Kommenda, M.–Scheibenpflug, A.–Pitzer, E.–Vonolfen, S.–Kofler, M.–Winkler, S.–Dorfer, V.–Affenzeller, M., 2014, *Architecture and design of the heuristic lab optimization environment. In: In: Klempous, R., Nikodem, J., Jacak, W., Chaczko, Z. (Eds.), Advanced Methods and Applications in Computational Intelligence. Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, vol. 6. 197–261. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01436-4_10.