

## Impacts of forest fires on forest soils - Current state and the next research perspectives

### Vplyv lesných požiarov na pôdu – súčasný stav a perspektívy výskumu

Juraj Bebej<sup>1</sup>, Katarína Koristeková<sup>2\*</sup>, Jaroslav Škvarenina<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Forestry, Technical University in Zvolen, TG Masaryka 24, Zvolen SK-96053, Slovakia; [bebej@tuzvo.sk](mailto:bebej@tuzvo.sk)

<sup>2</sup> Faculty of Wood Sciences and Technology, Technical University in Zvolen, TG Masaryka 24, Zvolen SK-96053, Slovakia; [katarina.koristekova@gmail.com](mailto:katarina.koristekova@gmail.com)

<sup>1</sup> Faculty of Forestry, Technical University in Zvolen, TG Masaryka 24, Zvolen SK-96053, Slovakia; [jaroslav.skvarenina@tuzvo.sk](mailto:jaroslav.skvarenina@tuzvo.sk)

\* Corresponding author: [katarina.koristekova@gmail.com](mailto:katarina.koristekova@gmail.com)

*Review*

*Received: July 7, 2018; Accepted: July 20, 2018; Published: July 31, 2018;*

#### Abstract

The methodology of laboratory-controlled experiments widely used to study the direct effects of forest fires regarding the both, the organic matter and the forest soil, should be expanded by studying the spatial-temporal framework of transformation processes, that are conditioned driven by the interactions of between the ash with and the forest-modified modified forest soil that will start in the forest environment immediately after the fire. Based on this knowledge, it will be possible to manage implement effective adaptation and remediation measures measurement in the areas affected by forest fires.

**Keywords:** forest fire; soil; the laboratory-controlled experiments

#### 1 Introduction

The results of expertise carried out on climate change impacts in the conditions of Slovakia (The 6-th National Communication SVK on Climate Change 2013) show that in the future, the most important abiotic natural origin harmful agents in this country will include land and forest fires and landslides. These assumptions have also been confirmed by the Report issued by the Intergovernmental Panel on Climate Change [1]. Consequently, there may be expected serious commercial losses, mainly in the Central and Eastern Europe [2-4].

These risks will cause negative impacts on the quality, health condition, resistance and overall fitness of forest ecosystems, which will reduce their hydric, production and eco-

#### 1 Úvod

Podľa expertnej analýzy dopadov zmeny klímy v podmienkach Slovenska (6. Národná správa o zmene klímy 2013), k najvýznamnejším abiotických prírodným škodlivým činiteľom budú v budúcnosti patriť okrem iných aj krajinné a lesné požiare a zosuvy pôdy. Tieto predpoklady boli potvrdené aj správou medzinárodného panelu pre klimatickú zmenu [1], na základe čoho možno predpokladať vznik významných hospodárskych škôd, najmä v strednej a východnej Európe [2-4].

Dôsledkami týchto rizík budú negatívne dopady na kvalitu, zdravotný stav, rezistenciu a celkovú konštitúciu lesných ekosystémov vedúcich k zníženiu hydrických, produkčných, ako aj ekostabilizačných schopností lesných

stabilisation potential – resulting in yields decreasing, costs increasing and shortening the optimum rotation period [5, 6].

For these reasons, it is necessary not only to analyse the forest ecosystems vulnerability by the specific natural disasters [7], but also to recognise the potential negative impacts of such disasters on forest ecosystems, including problems related to the effective management of the fire-devastated land. Solving of these problems requires innovation of the commonly used research methods and complementing them with research in laboratory-controlled experiments.

## 2 Problems review and Discussion

The impacts of fires on physical-chemical and biological parameters of soils depend on the intensity and duration of the heat transfer into soil [8]. Biological changes in the soil are initiated in the upper soil horizons just at low temperatures from 40–121 °C [9], while the soil surface temperature accompanying forest fires ranges within 200–300 °C [10], in shrubby areas 500–700 °C, in meadows and pastures 200–300 °C [9]. The fire-induced soil modifications depend on the temperature and time.

The identification of the maximum fire temperature is necessary not only for recognising the direct fire impact on the surrounding ecosystem, but also for effective management of the fire-devastated land [11]. The fire impact on soil is complex, consequently, the study of this impacts needs comprise all the key soil properties (organic matter content, soil material repellence, grain size structure), along with the acting factors (fire intensity and type); as omitting a single one can cause misinterpretation of the results obtained [12]. Today, it becomes obvious that the best-fitting methods for investigating the fire impacts on forest soil are the methods used in laboratory-controlled conditions. These methods are the only ones allowing to control the temperature and time influencing the processes running in soils [13], and to compare the results obtained in this way with the results obtained at field works in forest-fire-affected forest ecosystems [12]. The methods applied in laboratory-controlled experiments on forest fires impacts on forest soils are based on analysing heat processes accompanying the organic matter (mainly litter-fall) combustion at temperatures 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450,

ekosystémov, čo bude viesť k znižovaniu výnosov, zvyšovaniu nákladov a skracovaniu optimálnej rubnej doby [5, 6].

Z uvedených dôvodov je potrebné nielen analyzovať zraniteľnosť lesných ekosystémov jednotlivými prírodnými živlami [7], ale aj spoznať negatívne dôsledky ich potenciálnych vplyvov na lesné ekosystémy, vrátane otázok efektívneho manažmentu požiarom devastovaných území. Riešenie takejto problematiky vyžaduje aktualizovať doposiaľ zavedené postupy výskumu a tieto rozšíriť aj o problematiku výskumu v laboratórnych podmienkach.

## 2 Prehľad problematiky a diskusia

Vplyv požiarov na fyzikálno-chemické a biologické parameter pôd je determinovaný intenzitou a dĺžkou trvania transferu tepla do pôdy [8]. Biologické zmeny v pôde sa spúšťajú pri nízkych teplotách a v najvrchnejších pôdnych horizontoch v intervale 40–121 °C [9], pričom teploty dosahované na povrchu pôd pri lesných požiaroch sú v rozmedzí 200–300 °C [10], v krovinatom území 500–700 °C, zatiaľ čo na lúkach a pasienkoch v rozsahu 200–300 °C [9]. Zmeny v pôdach spôsobené požiarom závisia od dosiahnutej teploty a časovej dĺžky jej pôsobenia.

Určenie maximálnej teploty požiaru je potrebné nielen z pohľadu poznania jej priameho vplyvu na okolitý ekosystém, ale rovnako dôležité je aj pre efektívny manažment krajiny postihnutej požiarom [11]. Nakoľko vplyv požiaru na pôdu je komplexný, štúdium jeho pôsobenia na pôdu sa musí zamerať na všetky kľúčové pôdne vlastnosti (napr. obsah organickej hmoty, repelenciu pôdneho materiálu, zrnitostné zloženia), ruka v ruke s pôsobiacimi faktormi (napr. intenzita a druh požiaru), nakoľko opomenutie niektorých z nich môže viesť k chybnéj interpretácii získaných výsledkov [12]. V súčasnosti sa ukazuje, že najlepšou metodológiou výskumu vplyvov požiarov na pôdu je výskum uskutočňovaný v laboratórnych podmienkach, nakoľko iba v tomto prípade je možné kontrolovať teplotné a časové vplyvy na priebeh procesov v pôdach [13], a takto získané údaje konfrontovať s výsledkami získanými pri terénnych prácach v požiarom postihnutých lesných ekosystémoch [12]. Aplikované metódy laboratórneho výskumu vplyvov požiarov na pôdu sú

500 and 550 °C, which result in study of percentage changes in the weight of the combusted material, ash colour changes, CaCO<sub>3</sub> concentration, Ph values, electric conductivity (EC) values and nutrient elements (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> a Na<sup>+</sup>) contents in ash leachates [14] obtained by combusting qualitatively various litter-fall types from various tree species. Processing of these data will provide information of how the litter-fall combustion can affect the forest soil threats by erosion, how ash substances can influence the soil aggregates stability and on the maximum temperature of organic material (OM) combustion [15].

Much more intricate is study of the fire impacts on the soil itself, as the research results obtained at low fire intensities or during specific fire types (crown fire) manifest that there have been no significant changes to the soil properties [8]. On the other hand, there have been documented several cases showing that the temperature changes induced by fire-heat improved stability of soil aggregates, such as due to thermal fusion of soil particles or due to re-crystallisation of the soil mineral components, particularly clay minerals [16]. Another possible contributing factor is the condensation of hydrophobic substances into bigger aggregates [17]. It is, however, necessary to note that in most cases, certain soil properties related to the soil particles aggregation are directly influenced by heat released during fires. In case of OH content, there has been found [18] that the soils with OH as the principal compaction material for soil aggregates creation manifested improved aggregates stability under heating until 170 °C, followed by a decrease starting from 220 °C.

Soil water repellence (WR) is also sensitive to the heat released at fires [19]. The research [20] has confirmed an increase in WR values over a temperature interval of 175–200 °C, and conversely a WR decrease over 270–300 °C. There has also been identified certain soil parameters, such as clay fraction content and specific mineral composition of hygrophilous soil, suspect to back up the repellence values unchanged during fires [21, 22].

založené na analyzovaní teplotných procesov pri spaľovaní organickej hmoty (hlavne opadu) pri teplotách 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 a 550 °C, výsledkom ktorých je štúdium % zmien v hmotnosti spaľovaného materiálu, zmena farby popoloviny, zmena koncentrácie CaCO<sub>3</sub>, pH, elektrickej vodivosti (EC) a nutričných prvkov (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> a Na<sup>+</sup>) vo výluhoch z popoloviny [14] získanej zo spaľovania kvalitatívne rozdielnych druhov opadu z rôznych drevín. Spracovaním takto dostupných údajov možno získať informácie o vplyve spaľovania opadu na ohrozenosť lesných pôd eróziou, vplyve popolovín na stabilitu pôdnych agregátov, ako aj o maximálnej teplote spaľovania OH [15].

Značne komplikovanejšia je štúdia vplyvu požiarov na samotnú pôdu, nakoľko na základe terénnych pozorovaní pri slabej intenzite požiaru, resp. pri špecifických druhoch požiaru (napr. korunový požiar) často nedochádza k významným zmenám pôdnych vlastností [8]. Na strane druhej existuje viacero zdokumentovaných prípadov, kedy teplotné zmeny vyvolané požiarom spôsobujú zvýšenú stabilitu pôdnych agregátov, napr. v dôsledku teplotnej fúzie pôdnych častí, ako aj rekryštalizácie minerálneho podielu pôd, osobitne predovšetkým ílových minerálov [16]. Na uvedených skutočnostiach sa môže podieľať aj kondenzácia hydrofóbných substancií do väčších agregátov [17]. Avšak, je potrebné zdôrazniť, že vo väčšine prípadov niektoré pôdne vlastnosti súvisiace so spájaním pôdnych častí sú priamo ovplyvnené teplom uvoľňovaným pri požiaroch. V prípade obsahu OH bolo zistené [18], že v pôdach, v ktorých je OH hlavným cementačným materiálom pôdnych agregátov, zahrievanie pôd do cca 170°C zvyšovalo stabilitu agregátov, kým pri teplotách nad 220 °C dochádzalo naopak k poklesu tohto ukazovateľa.

Repelencia pôd je taktiež citlivá na teplotu uvoľňovanú pri požiaroch [19]. Výskum [20] potvrdil, že v teplotnom intervale 175–200 °C dochádzalo k nárastu hodnôt WR, kým naopak, jej pokles nastával pri 270–300 °C. Taktiež sa zistilo, že niektoré pôdne parametre, ako napr. obsah ílovej frakcie a špecifické mineralogické zloženie hydrofilných pôd môžu byť zodpovedné za skutočnosť, že u takýchto pôd nedochádza pri požiaroch k zmene repelencie [21, 22].

Remarkable is a positive correlation between the soil water repellence and the soil aggregates stability [12, 19, 21, 23], due to release and subsequent condensation of hydrophobic substances on the soil aggregates surface.

The fire-induced soil mineral transformation takes place at gibbsite at about 200 °C [24] in case of goethite, at about 300 °C in case of hematite [25] and from 500 to 700 °C in case of kaolinite [26]. The fire-induced soil aggregation leading to improving the soil aggregations stability is frequently caused by the decomposition of clay materials [16] and at temperature > 500–600 °C, these processes can induce changes to the soil grain structure [27, 28].

The analysis of the results obtained in laboratory-controlled experiments with fires on forest soils indicates existence (Table 1) of a “void space” in this area, concerning two substantial issues:

- Combustion processes relating to organic matter from organic horizons of forest soils, comprising, unlike the homogenised litter-fall material, also the material from the understorey and grassy material of varied species composition and different humification grades,
- Leachates of ash substances interacting with mineral fractions from the fire-modified soils, which can modify substantially the soil properties caused by the direct fire impact.

It becomes evident, however, that the “*per partes*” analysis of the litter-fall combustion processes and the heat-induced transformation processes running in soil can only provide the knowledge base for recognising the immediate and direct fire-induced effects on soils and OM; nevertheless, such analysis does not provide solutions for problems connected with the subsequent “post-processing” soil modifications – interactions between the leachates from the ash materials and the fire-affected soil. This is the only possible way how to assess the fire impacts on forest ecosystems over longer time periods and how to optimize remediation measures, if any, for restoring the complete functionality of forest ecosystems.

Pozoruhodné je zistenie o pozitívnej korelácii medzi repelenciou pôd a stabilitou pôdnych agregátov [12, 19, 21, 23] spôsobené uvoľňovaním a následným kondenzovaním hydrofóbných substancií na povrchu pôdnych agregátov.

Minerálna transformácia pôd vplyvom požiarov prebieha pri gibbsite pri cca 200 °C [24] u goethite transformácia na hematite sa odohráva pri cca 300 °C [25] kaolinite v rozmedzí 500 až 700 °C [26]. Agregácie pôd pri požiaroch vedúca k rastu stability pôdnych agregátov je často zapríčinená dekompozíciou ílových minerálov [16] pričom tieto procesy môžu často viesť pri teplotách > 500 - 600 °C k zmene zrnitostného zloženia pôd [27, 28].

Analýza výsledkov prác laboratórneho výskumu požiarov na lesných pôdach naznačuje (Tab. 1), že v súčasnosti existuje v tejto oblasti “biele územie”, ktoré sa dotýka dvoch zásadných oblastí:

- Problematiky procesov spaľovania organickej hmoty z organických horizontov lesných pôd, ktoré na rozdiel od spaľovania materiálovo homogénneho opadu pozostávajú aj z materiálu podrastu a trávovín rôzneho zloženia v rôznom stupni humunifikácie,
- Problematiky interakcie výluhov z popolovín s minerálnym podielom požiarom pozmenených pôd, ktoré môžu v zásadnej miere modifikovať pôdne vlastnosti podmienené priamym pôsobením požiaru.

Ukazuje sa totiž, že “*per partes*” analýza procesov spaľovania opadu a transformačných procesov v pôde, podmienených požiarom vedie len k poznaniu okamžitých a priamych efektov požiarov na OH a pôdu, ale nerieši otázky súvisiace s ďalšími “post-procesingovými” zmenami v pôdach - interakciou výluhov z popolovín s požiarom postihnutou pôdou. Je zrejmé, že jedine takýmto spôsobom je možné zhodnotiť vplyv požiarov na lesný ekosystém v dlhšom časovom rámci a optimalizovať prípadné remediačné opatrenia na obnovu plnej funkcionality lesných ekosystémov.

### 3 Conclusion

The causal link fire – forest ecosystem needs parallel solving of the problem concerning the prevention of fire outbreaks in forest environment and the problem of immediate and delayed impacts of the fire on the forest ecosystems – based on the interactions between the leachates from ash substances and the fire-affected soil. Considerable promises have been offered thanks to the methodology used in the laboratory – controlled experiments.

Implementation of these approaches will enable to recognize the temporal-spatial dimensions of transformation processes causing the changes in the hydro-physical, hydrological and soil-chemical parameters of the fire-affected forest soils, influencing the land vulnerability against erosion and this land hydrologic regimen over the affected area. Only such knowledge will enable an effective control of adaptation and remediation measures implemented in forest-fire-affected areas.

### Acknowledgement

This work has been supported by the Slovak Research and Development Agency based on the Agreement No. APVV-15-0425.

### 3 Záver

V kauzálnom reťazci požiar-lesný ekosystém je potrebné súbežne riešiť problematiku prevencie vzniku požiarov v lesnom prostredí s problematikou priameho, ako aj následného vplyvu požiarov na lesný ekosystém podmieneného interakciou výluhu z popolovín s požiarom postihnutou pôdou. Veľké možnosti v tejto oblasti ponúka zavedená metodológia laboratórne kontrolovaných experimentov. Aplikáciou takýchto postupov bude možné poznať časovo-priestorový rozmer transformačných procesov zmien hydrofyzikálnych, hydrologických a pedochemických parametrov lesných pôd zasiahnutých požiarom, ovplyvňujúcich zraniteľnosť území voči pôsobeniu erózie a hydrologický režim v takomto území. Až na základe takto získaných poznatkov bude možné efektívne riadiť adaptačné a remediačné opatrenia v územiach zasiahnutých lesnými požiarimi.

### PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0425.



**References / Literatura**

- [1] IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [2] Silva, M. C. S., Naozuka, J., da Luz, J. M. R., de Assunção, L. S., Oliveira, P.V., Vanetti, M. C. D., Bazzolli, D. M. S., Kasuya, M. C. M., 2012: Enrichment of *Pleurotus ostreatus* mushrooms with selenium in coffee husks. Food chemistry. 131: 558-563. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.023>.
- [3] Keenan, T., Serra, J. M., Lloret, F., Ninyerola, M., Sabate, S. 2011: Predicting the future of forests in the Mediterranean under climate change, with niche- and process-based models: CO<sub>2</sub> matters. Global Change Biology. 17: 565-579. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02254x.
- [4] Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M., Wanner, H. 2004: European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. Science. 303: 1499-1503.
- [5] Loisel, P. 2011: Faustmann rotation and population Dynamics in the presence of a risk of destructive events. Journal of Forest Economics. 17(3): 235-247.
- [6] Loisel, P. 2014: Impact of storm risk on Faustmann rotation. Forest Policy and Economics. 16(1): 191-198.
- [7] Holecý, J. 2010: The paradigm of risk and measuring the vulnerability of forests by natural hazards. In Bioclimatology and Natural Hazards. Štrelcová, K., Matyas, C., Kleidon, A., Lapin, M., Matejka, F., Blaženec, M., Škvarenina, J., Holécý, J. (eds.). Springer Science + Business Media. p. 231-247.
- [8] Mataix-Solera, J., Cerdà, A., Arcenegui, V., Jordán, A., Zavala, L.M., 2011: Fire effects on soil aggregation: A review. Earth-Science Reviews 109: 44–60.
- [9] Neary, D., Klopatek, C.C., DeBano, L.F., Ffolliott, P.F., 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. Forest Ecology and Management 122: 51–71.
- [10] Rundel, P.W., 1983. Impact of fire on nutrient cycles in Mediterranean-type ecosystems with reference to chaparral. In: Kruger, F.J., Mitchell, D.T., Jarvis, J.U.M. (Eds.), Mediterranean- Type Ecosystems: The Role of Nutrients. Springer-Verlag, New York, USA, pp. 192–2207.
- [11] Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Úbeda, X., Martín, D., 2012: Fire and soils: Key concepts and recent advantages. Geoderma 191: 3 – 13.
- [12] Mataix-Solera, J., Doerr, S.H., 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoil from fire affected pine forests in southeastern Spain. Geoderma 118: 77–88.
- [13] Bento-Gonçalves, A. J., Vieira, An, Ubeda, X., Martín, D., 2012. Fire and soils: Key concepts and recent advances. Geoderma 191: 3 – 13.
- [14] Úbeda, X., Pereira, P., Outeiro, L., Martín, D. A., 2009: Effects Of Fire Temperature On The Physical And Chemical Characteristics Of The Ash From Two Plots Of Cork Oak (*Quercus Suber*). Land Degrad. Develop. 20: 589–608.
- [15] Gray, D.M., Dighton, J., 2006: Mineralization of forest litter nutrients by heat and combustion. Soil Biology & Biochemistry 38: 1469-1477.
- [16] Giovannini, G., Lucchesi, S., 1997. Modifications induced in soil physico-chemical parameters by experimental fires at different intensities. Soil Science 162: 479–486.

- [17] Terefe, T., Mariscal-Sancho, I., Peregrina, F., Espejo, R., 2008. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils. A laboratory study. *Geoderma* 143: 273–280.
- [18] Soto, B., Benito, E., Diaz-Fierros, F., 1991. Heat-induced degradation processes in forest soils. *International Journal of Wildland Fire* 1: 147–152.
- [19] García-Corona, R., Benito, E., de Blas, E., Varela, M.E., 2004. Effects of heating on some soil physical properties related to its hydrological behaviour in two north-western Spanish soils. *International Journal of Wildland Fire* 13: 195–199.
- [20] DeBano, L.F., 1981. *Water Repellent Soils: A State-of-the-Art*. US Department of Agriculture Forest Service General Technical Report, PSW-46, Berkeley, CA, p. 21.
- [21] Giovannini, G., Lucchesi, S., 1983. Effect of fire on hydrophobic and cementing substances of soil aggregates. *Soil Science* 136: 231–236.
- [22] Zornoza, R., Mataix-Solera, J., Fuerrero, C., Arcenegui, V., García-Orenes, F., Mataix-Beneyto, J., Morugán, A. Evaluation of soil quality using multiple lineal regression based on physical, chemical and biochemical properties. *Science of The Total Environment* 378: 233-237.
- [23] Jordán, A., Zavala, L.M., Mataix-Solera, J., Nava, A.L., Alanís, N., 2011. Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. *Catena* 84: 136–147.
- [24] Rooksby, H.P., 1972. Oxides and hydroxides of aluminium and iron. In: Brown, G. (Ed.), *The X-Ray Identification And Cristal Structures Of Clay Minerals*. Miner. Soc, London, pp. 354–392.
- [25] Cornell, R.M., Schwetmann, U., 1996. *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses*. VCH Weinheim, Berlin.
- [26] Richardson, H.M., 1972. Phase changes which occur on heating kaolin clays. In: Brown, G. (Ed.), *The X-Ray Identification And Cristal Structures Of Clay Minerals*. Miner.Soc., London, pp. 132–142.
- [27] Almendros, G., González-Vila, F.J., Martin, F., 1990: Fire-induced transformation of soil organic matter from an oak forest: an experimental approach to the effects of fire on humic substances. *Soil Science* 149: 158–168.
- [28] Ketterings, Q.M., Bigham, J.M., Laperche, V., 2000. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash-and-burn fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1108–1117.