

Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta,

Katedra fyzickej geografie a geoekológie

Historické a aktuálne problémy environmentálnych záťaží

RNDr. Ľubomír Jurkovič, PhD.

Katedra geochémie, Prírodovedecká fakulta UK v Bratislave

TEXT K PREDNÁŠKE

2019

Prednáška a text sú súčasťou riešenia projektu: KEGA č. 003UK-4/2017: Terénne vyučovanie geovied s využitím vybraných náučných chodníkov

Pojem **environmentálna záťaž** sa v súčasnosti používa pri pomenovaní rôznych problémov spájaných vo všeobecnosti so znečistením životného prostredia, ktoré pochádza z rôznych ľudských činností realizovaných v minulosti, pričom ich negatívne dôsledky predstavujú riziká aj v súčasnosti. Uvedený pojem environmentálna záťaž (ďalej EZ) zahŕňa staré skládky odpadov, staré banské diela, haldy, odkaliská a iné objekty starej banskej činnosti, územia znečistené armádnou činnosťou, opustené ale aj aktívne areály podnikov, produktovody, poľnohospodárske dvory, hnojiská atď., ktoré môžu byť významným zdrojom znečistenia podzemnej a povrchovej vody, horninového prostredia a pôd. Znečistenie zložiek životného prostredia v oblastiach výskytu EZ môže v dlhodobom horizonte ohrozovať zdravie človeka, zvierat a súčasne môže byť narušená stabilita krajiny. Zjednodušene môžeme povedať, že pod environmentálnou záťažou rozumieme taký antropogénny vstup do prostredia, ktorý má pôvod v minulosti s dôsledkami pretrvávajúcimi dodnes, pričom samotný zdroj znečistenia môže byť odstránený vhodným sanačným postupom, alebo môže byť dlhodobo aktívny.

Problematika EZ je aktuálna aj pri ďalších činnostiach ako je developerská činnosť (v rámci výstavby v územiach so znečistenými zeminami a podzemnými vodami), zmena majetkových vzťahov (napr. vstup investora do výrobných areálov, v ktorých existuje riziko znečistenia zemín a podzemnej vody), činnosť finančných inštitúcií (napr. zdokumentovanie bonity nehnuteľnosti ako objektu záložného práva).

Environmentálna záťaž je v zmysle geologického zákona (zákon č. 569/2007 Z. z.) zadefinovaná ako znečistenie územia spôsobené činnosťou človeka, ktoré predstavuje závažné riziko pre ľudské zdravie alebo horninové prostredie, podzemnú vodu a pôdu s výnimkou **environmentálnej škody**. Ide o široké spektrum území kontaminovaných priemyselnou, vojenskou, banskou, dopravnou a poľnohospodárskou činnosťou, ale aj nesprávnym nakladaním s odpadom. V súčasnosti sa problematiky environmentálnych záťaží dotýka novela zákona NR SR č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov, do ktorého bola zapracovaná aj problematika environmentálnych záťaží. Zákon nadobudol účinnosť 1. novembra 2009 a definuje pojmy ako environmentálna záťaž, **pravdepodobná environmentálna záťaž** (stav územia, kde sa dôvodne predpokladá prítomnosť environmentálnej záťaže), geologický prieskum životného prostredia zahŕňajúci prieskum pravdepodobných environmentálnych záťaží a prieskum environmentálnych záťaží, ďalej definuje sanáciu environmentálnej záťaže, informačný systém environmentálnych záťaží a štátny program sanácie (Šottník et al., 2015).

Riešenie problematiky environmentálnych záťaží sa dostalo do pozornosti začiatkom 90. rokov minulého storočia v súvislosti s ich odstraňovaním na územiach s pobytom vojsk bývalej Sovietskej armády. Na základe predbežných štúdií a odhadov sa na Slovensku odhadom nachádzalo okolo 30 000 potenciálnych zdrojov znečistenia. Systematickou inventarizáciou environmentálnych záťaží, realizovanou projektmi „*Systematická identifikácia environmentálnych záťaží v Slovenskej republike*“ a „*Regionálne štúdie hodnotenia dopadov environmentálnych záťaží na životné prostredie pre vybrané kraje (regióny)*“, bolo zistené, že 1845 lokalít predstavuje závažné nebezpečenstvo pre zdravie človeka a životné prostredie. Ide najmä o areály priemyselných podnikov, kde dochádzalo k dlhodobým skrytým a nekontrolovaným únikom nebezpečných látok do jednotlivých zložiek životného prostredia, veľkokapacitné poľnohospodárske podniky, železničné depá, nekontrolované skládky nebezpečných odpadov, nezabezpečené sklady pesticídov, pohonných hmôt a iných nebezpečných látok, znečistenie spôsobené ozbrojenými silami, ťažbou nerastov a inými činnosťami, počas ktorých sa dlhoročne a nekontrolované nakladalo s nebezpečnými látkami. Tieto látky v prostredí pretrvávajú, znečisťujú jeho jednotlivé zložky a dokázateľne negatívne ovplyvňujú zdravotný stav obyvateľstva vo svojom okolí (Paluchová et al., 2008, Jánová, 2009).

V nasledujúcom texte sa zameriam na stručnú charakteristiku problematiku EZ viazaných na banské činnosti a problémy viazané na deponovanie elektrárenských popolov. EZ viazané na oblasti ťažby a spracovania nerastných surovín (vrátane spaľovania uhlia) reprezentujú v súčasnosti v rámci Slovenska významné riziká, ktoré sa spájajú procesmi prebiehajúcimi na predmetných lokalitách ako aj s absenciou vhodného spravovania deponovaných odpadov na haldách a odvaloch ako aj sedimentov, kalov či popolov na odkaliskách. Z historického hľadiska je Slovensko známe vysokým počtom dobývaných rudných ložísk, na ktoré sú viazané banské haldy a odvaly s relatívne malým objemom ťažobných odpadov. Modernejšie metódy úpravy a spracovania rúd viedli ku významnému nárastu produkcie ťažobných odpadov a ku zmene ich ukladania, pričom dominantnými odpadmi sa stali najmä flotačné kaly a sedimenty ukladané na odkaliskách, prípadne v priestoroch samotných úpravni vyťažovaných rúd.

Vážnym environmentálnym problémom v rámci Slovenska je výskyt arzénu v elektrárenských popoloch deponovaných na viacerých lokalitách a najmä prítomnosť popolov s vysokými obsahmi As v pôdnom profile alúvia rieky Nitra ako dôsledok havárie odkaliska v Zemianskych Kostoľanoch. Elektrárenské popoly s vysokým obsahom arzénu na lokalite starej environmentálnej záťaže, boli v posledných rokoch skúmané pomocou širokého spektra mineralogických, geochemických a mikrobiologických metód (Jurkovič et al., 2011, Bolanz et al., 2012, Šimonovičová et al., 2016). Výskum bol zameraný na detailné definovanie minerálneho zloženia čerstvých popolov a popolov pochovaných pod poľnohospodárskymi pôdami so zameraním na výskyt arzénu, a taktiež ich vplyv na biodiverzitu pôdnych mikroorganizmov, ktorá sa rozvinula vplyvom dlhodobej expozície arzénom. Dôkazom vysokej adaptačnej schopnosti mikroorganizmov v skúmanom antropogénnom materiáli je aj izolácia a identifikácia niekoľkých nových bakteriálnych kmeňov, čo dáva predpoklad ich využitia v bioremediácii daného územia. Odstránenie As z kontaminovaného prostredia je pomerne zložité, keďže As nie je možné chemicky ani biologicky degradovať a jeho toxicita v pôde predstavuje zdravotné riziko. Účinnosť odstraňovania As z reálnych vzoriek pôd pochádzajúcich z jednej z najviac kontaminovaných lokalít na území Slovenska bola experimentálne overená nielen aplikovaním selektívnych pôvodných bakteriálnych druhov, ale aj aplikáciou alochtónneho bakteriálneho druhu (Peťková et al., 2016).

Činnosti spojené s ťažbou a úpravou rudných a nerudných surovín sa spájajú s ovplyvňovaním životného prostredia vo forme povrchových prejavov (banské haldy, odvaly, odkaliská, prepadnuté štôlne, opustené banské prevádzky, ruiny po spracovateľských prevádzkach, ai.), vo forme výtokov banských vôd z štôlní a s nimi súvisiacej precipitácie Fe-okrov v miestach výstupu vôd z banských priestorov (**obr. 1**), prípadne vo forme drenážnych vôd z hald, odvalov a odkalísk, alebo úletov znečisťujúcich látok a prachových častíc z pražiarní rúd. Z dlhodobého hľadiska je materiál deponovaný na odvaloch, haldách a odkaliskách permanentným zdrojom kontaminácie jednotlivých zložiek životného prostredia. Heterogenita ťažobných odpadov a vlastného geologického prostredia nastoľuje mnohé otázky pre celkové hodnotenie rizikovosti EZ spôsobených banskou činnosťou, nakoľko tu prebiehajú intenzívne procesy mechanickej a chemickej premeny uloženého materiálu za súčasného vylúhovania rôznych potenciálne toxických látok do životného prostredia (**obr. 2**). Nezanedbateľnou otázkou ostáva dlhodobá fyzikálna stabilita hald a úložísk flotačných kalov, ktoré sú náchylné na rozplavovanie vplyvom náhlych klimatických udalostí (prívalové dažde, lokálne záplavy). V čerstvej pamäti je najmä mimoriadna situácia, ktorá sa stala v novembri 2019 na starom odkalisku v priestore opusteného Sb-ložiska Dúbrava v Nízkych Tatrách (viac na <https://myliptov.sme.sk/c/22264542/havaria-na-odkalisku-dolinou-sa-valila-voda-pripominala-tsunami.html>).



Obr. 1: Vznikajúce Fe-okre precipitujúce z banskej vody štôlne Agnes (EZ Poproč – Petrova dolina)

Prejavy ťažobnej a úpravárenskej činnosti často viedli ku značnému znečisťovaniu jednotlivých zložiek životného prostredia v širšom okolí starých, zlikvidovaných, uzatvorených alebo opustených banských areálov a viaceré takéto lokality na Slovensku sú zaraďované medzi EZ. Lokality po ťažbe nerastných surovín zaradené medzi EZ predstavujú 10,5 % zo všetkých EZ evidovaných v rámci projektu *Systematická identifikácia environmentálnych záťaží v Slovenskej republike* (Jánová, 2009). Z celkového počtu identifikovaných EZ na Slovensku (1819 lokalít v Registri EZ) je cca 100 lokalít zaradených ako vysoko rizikových lokalít (predstavujú závažné nebezpečenstvo pre zdravie človeka a životné prostredie) a z tohto počtu približne 20 lokalít sú EZ viazané na ťažobné činnosti (rudy, nerudné suroviny, ropa a zemný plyn, odkaliská) (Paluchová et al., 2008).



Obr. 2: Lom Šobov – zdroj acidifikácie životného prostredia

Riešenie problematiky „banských lokalít EZ“ je rozdelené v súčasnosti do dvoch úrovní. Na jednej strane je to podrobný geologický prieskum životného prostredia a sanácie EZ realizované na úrovni štátnych orgánov a inštitúcií, ktoré reprezentuje Ministerstvo životného prostredia SR, Slovenská agentúra životného prostredia a Štátny geologický ústav Dionýza Štúra (ŠGÚDŠ) v kombinácii s geologickými prácami realizovanými súkromnými spoločnosťami. Na druhej strane je to základný a aplikovaný výskum v akademickej sfére, ktorý reprezentujú najmä vedecké projekty realizované na vysokých školách a Slovenskej akadémii vied.

Prieskum geologického prostredia na vybraných 8 banských lokalitách po ťažbe nerastných surovín v rámci úlohy MŽP SR *Prieskum environmentálnych záťaží na vybraných lokalitách SR* (2014 – 2015) realizovali vybrané spoločnosti z geologického odboru, ktoré splnili kritériá výberového

konania. Jednotlivé projekty na prieskum vybraných lokalít EZ boli vypracované podľa zákona č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach v znení neskorších predpisov a vyhlášky č. 51/2008 Z. z., ktorou sa vykonáva geologický zákon. Prieskum EZ a vypracovanie analýzy rizika znečisteného územia (smernica MŽP SR č. 1/2015-7) boli realizované na nasledovných lokalitách: Nižná Slaná - odkalisko a haldy, Markušovce – okolie – ťažba rúd, Rudňany – ťažba a úprava rúd, Slovinky – ťažba a úprava rúd, Pezinok – oblasť rudných baní a starých banských diel, vrátane odkalísk, Poproč – Petrova dolina, Smolník – ťažba pyritových rúd, Merník – ortuťové bane. Výsledky realizovaných projektov na jednotlivých EZ boli spracované vo forme záverečných prác vrátane rozsiahlej prílohovej dokumentácie a sú uložené v Geofonde (ŠGÚDŠ, Bratislava).

Územie EZ Poproč – Petrova dolina sa nachádza v juhovýchodnej časti Spiško-gemerského rudohoria v oblasti Petrovej doliny, v katastri obce Poproč. Odvodňuje ho potok Olšava, ktorý je ľavostranným prítokom rieky Bodva. Opustené Sb ložisko Poproč patrí spolu s ložiskami Betliar, Čučma, Spišská Baňa a Zlatá Idka k významným historicky ťaženým rudným ložiskám južnej časti Slovenského rudohoria. Hlavnými minerálmi hydrotermálnych žíl sú kremeň a antimonit s menej častým pyritom, arzenopyritom, berthieritom, tetrahedritom, sfaleritom, zinkenitom a fülöpitom (Klimko et al., 2009). Ťažba na ložisku Poproč začala v 17. storočí a skončila v roku 1965. Najintenzívnejšia ťažba bola v rokoch 1931 – 1965, kedy sa vyťažilo 10 000 merických ton antimónu a 80 kg zlata. Ruda sa na ložisku spracovávala flotáciou a odpad z flotačnej úpravne sa deponoval na odkaliskách, ktoré sú často v priamom styku z povrchovým tokom, nie sú správne zahradené a izolované od okolitého ekosystému (Kaličiaková et al., 1996). Na **obr. 3** je zobrazený profil deponovaných flotačných kalov v aluviu potoka Olšava.



Obr. 3: Profil flotačných kalov v aluviu potoka Olšava (EZ Poproč – Petrova dolina)

Hlavnými znečisťujúcimi látkami v prírodných zložkách životného prostredia lokality Poproč sú arzén (As) a antimón (Sb), a lokálne aj zvýšené obsahy Pb, Zn a Cu. Pôdy a riečne sedimenty na lokalite Poproč vykazujú veľmi vysoké celkové obsahy As a Sb (pôdy: $As_{max} 1714 \text{ mg.kg}^{-1}$, $Sb_{max} 6786 \text{ mg.kg}^{-1}$, riečne sedimenty: $As_{max} 5560 \text{ mg.kg}^{-1}$, $Sb_{max} 1360 \text{ mg.kg}^{-1}$). Napriek relatívne nízkym percentuálnym podielom Sb vo vodorozpustnej frakcii pôd (rozsah 0,5 – 3,06 %) a riečnych sedimentov (rozsah 0,08 – 7,15 %), sa bodové zdroje môžu podieľať významnou mierou na znečistení prírodných vôd, vzhľadom na vysoké celkové obsahy Sb v sledovaných médiách. Najdôležitejší zdroj kontaminácie povrchových vôd toku Olšava predstavuje banská voda vytekajúca zo štôlne Agnes, v ktorej bola zistená koncentrácia Sb $380 \mu\text{g.l}^{-1}$ a As $2400 \mu\text{g.l}^{-1}$, vo vode zo štôlne Anna dosahuje koncentrácia Sb vo vode $180 \mu\text{g.l}^{-1}$ (Hiller et al., 2012). Z ostatných stopových prvkov má významné zastúpenie v banských vodách Ni, Zn resp. Co ($101 \mu\text{g.l}^{-1}$). Ďalším

zdrojom kontaminácie vôd je neriadené odkalisko v areáli Rudných baní nad obcou Poproč. Vo vytekajúcej vode pod odkaliskom bola zistená koncentrácia Sb $400 \mu\text{g.l}^{-1}$ a As $1950 \mu\text{g.l}^{-1}$. Kontaminácie jednotlivých zložiek životného prostredia na lokalite Poproč sa prejavuje aj zvýšenými obsahmi As a Sb v rastlinách, vysoké hodnoty obsahu As ($49,8 \text{ mg.kg}^{-1}$) boli zaznamenané v listoch púpavy lekárskej (*Taraxacum officinale*) a čistci lesnom (*Stachys sylvatica*), kde celkový obsah As dosahoval až takmer 70 mg.kg^{-1} (Jurkovič et al., 2010).

V súčasnom období v nadväznosti na ŠPS EZ 2016 – 2021 sa realizuje sanácia na prioritnej lokalite EZ po ťažbe nerastných surovín - SK/EZ/KS/353 Poproč – Petrova dolina, ktorá bola zaradená medzi prioritné lokality EZ na základe výsledkov prieskumu (Auxt et al., 2015). Multikriteriálne hodnotenie možných sanačných opatrení stanovilo základ pre navrhnuté sanačné postupy na elimináciu environmentálnych a zdravotných rizík vyplývajúcich z povahy znečistenia na lokalite. Ako vhodné riešenie situácie na lokalite Poproč bola zvolená kombinácia sedimentačnej nádrže umiestnenej pred štôľňou Agnes a dočistenia banských vôd z nádrže sorpciou na odpadové Fe-špony (reprezentujúce nulavaletné železo, **obr. 4**). Uvedený spôsob čistenia kontaminovaných banských vôd bol overený in-situ v experimentálnom projekte PRIF UK (Sekula et al., 2018). Zároveň sa na lokalite Poproč – Petrova dolina predpokladá aktívna metóda sanácie odkaliska a deponovaných flotačných kalov (Auxt et al., 2015).



Obr. 4: Štôľňa Agnes s experimentálnym kontajnerom na pasívne čistenie vôd (náplň kontajnera - odpadové Fe špony)

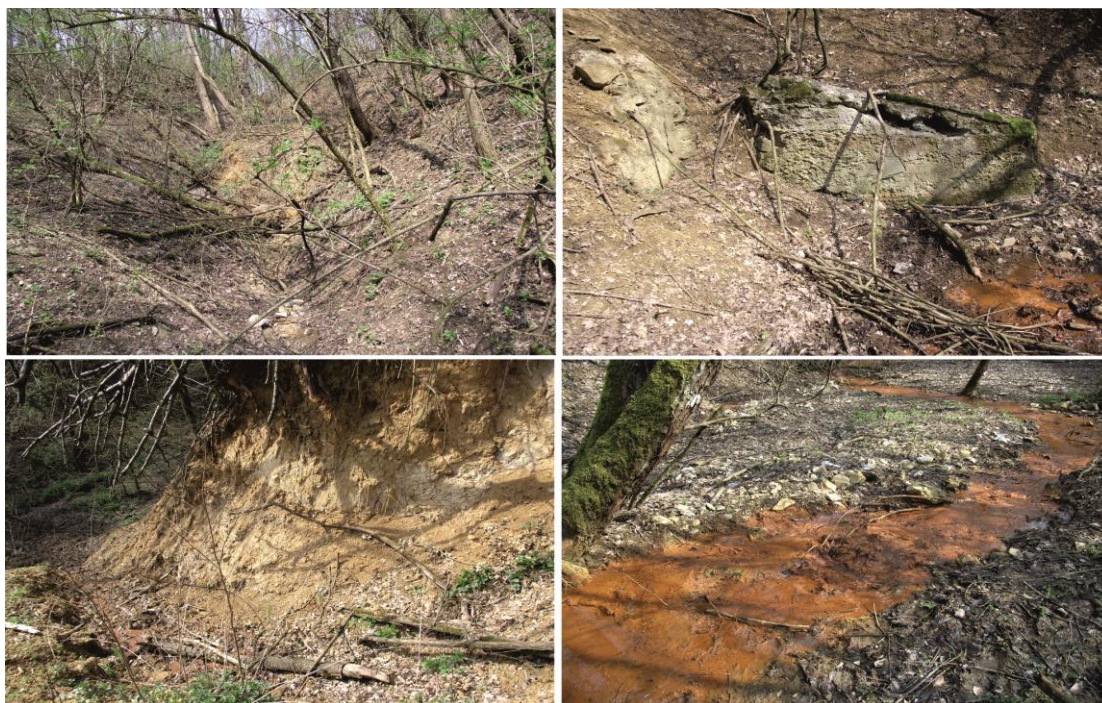
Remediačný postup založený na použití nula-valentného železa je potenciálne vhodný spôsob odstraňovania arzénu a antimónu v danej kontaminovanej oblasti. Procesy tiež zahŕňajú sorpciu arzénu/antimónu na povrch Fe hydroxidov, taktiež môže dochádzať ku koprecipitácii. Počas chemických reakcií dochádza ku zvýšeniu hodnôt pH a obsahu rozpusteného železa vo vode, efektívnosť metódy tiež závisí od množstva rozpustného kyslíka. Veľký špecifický povrch zlúčenín Fe (Fe oxyhydroxidov vznikajúcich pri aplikácii nano-železa, Fe-odpadov) a ich chemická povrchová reaktivnosť podmieňujú schopnosť špecificky sorbovať rozličné rozpustné látky (ťažké kovy, polokovy, oxoanióny, napr. fosfáty). Vhodnosť využitia Fe, resp. Fe oxyhydroxidov na sorpciu As, Sb, Cu, Zn a Cd bola overená aj v prípade reálnych vzoriek banských vôd zo slovenských banských lokalít (Pezinok, Pernek, Dúbrava, Poproč, Čučma), pričom všetky testované vody sa podarilo počas

experimentov úspešne upraviť s vysokou účinnosťou (Chovan et al., 2010). Dôležité zistenie predstavuje skutočnosť, že nebol pozorovaný výrazný rozdiel pri použití rôznych foriem Fe⁰ (Fe granulát, Fe chip, práškové Fe a odpadové Fe špony) pri experimentoch a najmä ekonomicky dostupné odpadové Fe špony sa ukázali ako dostatočne efektívne, čo predstavuje významný prvkov pre inovatívnu sanačnú technológiu na tejto lokalite.

Mobilizácia kontaminantov z pevných substrátov geologického prostredia jednotlivých EZ závisí od vlastností prostredia, od fyzikálno-chemických vlastností kontaminantov a od minerálneho zloženia pôd a ťažobných odpadov. Exaktné hodnotenie mobilizácie kontaminantov do prostredia je možné realizovať formou *ex-situ* experimentov. V laboratórnych podmienkach je možné simulovať vylúhovacie procesy prebiehajúce v životnom prostredí, pričom dlhodobjším pravidelným zalievaním a vysúšaním zemín (kalov, sedimentov) je možné simulovať intenzívnejšie zvetrávacie procesy a tak študovať ich vplyv na mobilitu sledovaných prvkov a ich potenciálny prestup do zložiek životného prostredia. Príkladom takýchto experimentov sú štúdie Faragó et al. (2016) a Schwarzkopfová et al. (2018), v ktorých boli na pevné vzorky pôd resp. popolov aplikované rozdielne lúhovacie roztoky pre porovnanie rôznych scenárov mobilizácie kontaminantov (simulovaná dažďová voda – na simuláciu zrážok v reálnych podmienkach, roztok kyseliny citrónovej – simulácia prirodzených mikrobiálnych podmienok v pôdnom ekosystéme, resp. roztok glukózy a SAB média – pre zvýšenie aktivity pôdnej mykoflóry).

Experimentálnu štúdiu mobilných frakcií kovov v pôdach EZ Merník realizovala Kulikova et al. (2019). Pre hodnotenie potenciálne mobilizácie rizikových prvkov (Hg, Ni, Cr) na lokalite opusteného Hg ložiska v Merníku (**obr. 5**) boli použité činidlá s rôznou extrakčnou efektívnosťou (destilovaná resp. deionizovaná voda pre najslabšie viazané formy kovov, roztok CaCl₂ pre výmenné frakcie iónov ako vhodný indikátor bioprístupnej frakcie, špecifické extrakčné činidlá pre štúdium bioprístupnosti stopových prvkov ako EDTA, HOAc). Výsledky lúhovacích experimentov poukazujú na minimálny podiel mobilných frakcií sledovaných prvkov, čo súvisí s ich výskytom v pôdach a zeminách vo forme minerálnych fáz, ktoré sú v podmienkach aplikácie slabých extrakčných roztokov veľmi stabilné. Na potvrdenie týchto záverov je vhodné realizovať ďalšie štúdium vzoriek rastlinnej biomasy odobratých bezprostredne z územia bývalého ložiska. Nakoľko bioprístupnosť kovov z pôd môže byť ovplyvňovaná aj ďalšími faktormi, ako napríklad špecifické vlastnosti konkrétnych rastlinných druhov, ich vek atď., môže takéto štúdium priniesť nové a jedinečné poznatky. Aplikáciu roztokov kyselín je vhodné realizovať za účelom sledovania vplyvu zmien hodnoty pH prostredia na retenciu, resp. mobilitu kovov. Pokiaľ extrakcia s roztokom slabej kyseliny nemala značný vplyv na správanie sa prvkov, aplikácia roztoku s veľmi nízkym pH znamenala v prípade sledovaných prvkov ich násobnú mobilizáciu do experimentálneho roztoku. V prípade opustených banských lokalít, charakteristických tvorbou kyslých výluhov, môžu takéto výsledky naznačovať existenciu potenciálneho rizika vyžadujúceho dlhodobější monitoring šírenia znečistenia na území (Kulikova et al., 2019).

Dôležitou otázkou do budúcnosti ostáva zadefinovanie a exaktné hodnotenie šírenia znečistenia vo forme mobilných kontaminantov v suspenzii (Fe-okre, hydroxyoxidy Fe). Mnohé vedecké štúdie definujú tento spôsob šírenia rizikových látok ako kvantitatívne významný spôsob prenosu znečistenia povrchovými vodami (napr. Brachtýr et al., 2019). Vzhľadom na povahu znečisťujúcich látok, ktoré nepodliehajú degradácii, môžu byť tieto v rozpustnej forme transportované povrchovou vodou na veľké vzdialenosti. Znečisťujúce látky (najmä As, Sb, Zn, Pb, Ni, Cd) majú tendenciu sa vo vhodných geochemických podmienkach viazať na pevné substráty riečnych a dnových sedimentov (sekundárny zdroj znečistenia).



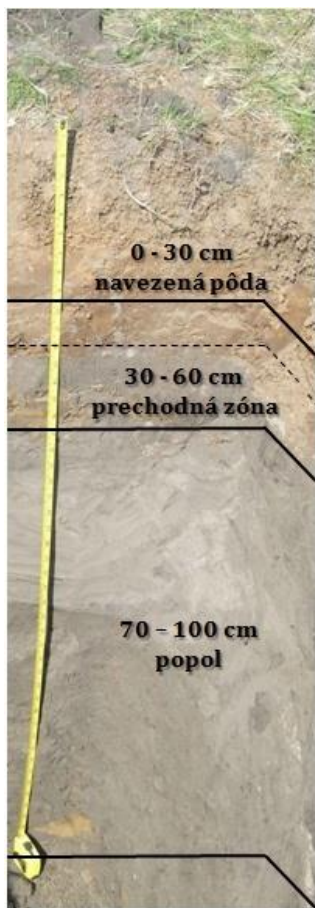
Obr. 5: Povrchové fenomény po ťazbe Hg rúd na lokalite EZ Merník – ortuťové bane

Iný príklad aktuálnych problémov starých environmentálnych záťaží predstavujú technozeme regiónu širšieho okolia obce Zemianske Kostolány v alúviu rieky Nitra. Táto lokalita predstavuje jedinečný systém 50 rokov starej záťaže, ktorá patrí v dôsledku ekologickej havárie odkaliska k najviac znečisteným lokalitám na Slovensku. V území Zemianske Kostolány je situované Pôvodné odkalisko, ktoré slúžilo na ukladanie naplavovaného elektrárenského popola zo spaľovania hnedého uhlia z prevádzky ENO Nováky. Primárne bolo odkalisko budované len na ukladanie škváry a popola. V roku 1963 sa rozhodlo o využívaní plochy odkaliska aj na ukladanie vápenného mlieka a chloridu vápenatého z Chemických závodov v Novákoch. V roku 1965 sa po intenzívnych dažďoch pretrhla základná hrádza Pôvodného odkaliska, na ktoré sa naplavoval popol z ENO Nováky. Do okolia sa v dôsledku stekutenia odkaliskového materiálu vylialo cca 3 milióny ton popola (**obr. 6**). Podľa dokumentu Týždeň vo filme z roku 1970 prišli v deň havárie o život traja ľudia. Voda zmiešaná s popolom unikala do doliny 5 dní, počas ktorých klesla hladina odkaliska o 3 metre. Primárnym dôvodom havárie bolo práve vytváranie nepriepustných vrstiev vápenných kalov, ktoré bránili odtoku vody smerom k drenážnemu systému (Slovenská energetika, 2011).



Obr. 6: Pohľad na rozplavený popolový materiál po pretrhnutí hrádze

Uvoľnenie popola s vysokým obsahom arzénu po pretrhnutí hrádze do okolitého prostredia významne ovplyvnilo nielen abiotické environmentálne zložky ako sú pôdy, vody a dnové sedimenty, ale aj pôdne mikroorganizmy. Dlhodobá expozícia a selekčný tlak pôsobením zvýšenej koncentrácie arzénu ovplyvnili formovanie špecificky prispôsobených autochtónnych mikroorganizmov. Viaceré štúdie boli zamerané na komplexné štúdium mineralogických, geochemických a mikrobiologických charakteristík špecifického antropogénneho substrátu, teda elektrárenských popolov pochádzajúcich zo spaľovania hnedého uhlia a pochovaných pod poľnohospodárskymi pôdami v priestore pod odkaliskom (Keegan et al., 2002; Čurlík, 2003; Jurkovič et al., 2011 a i.).



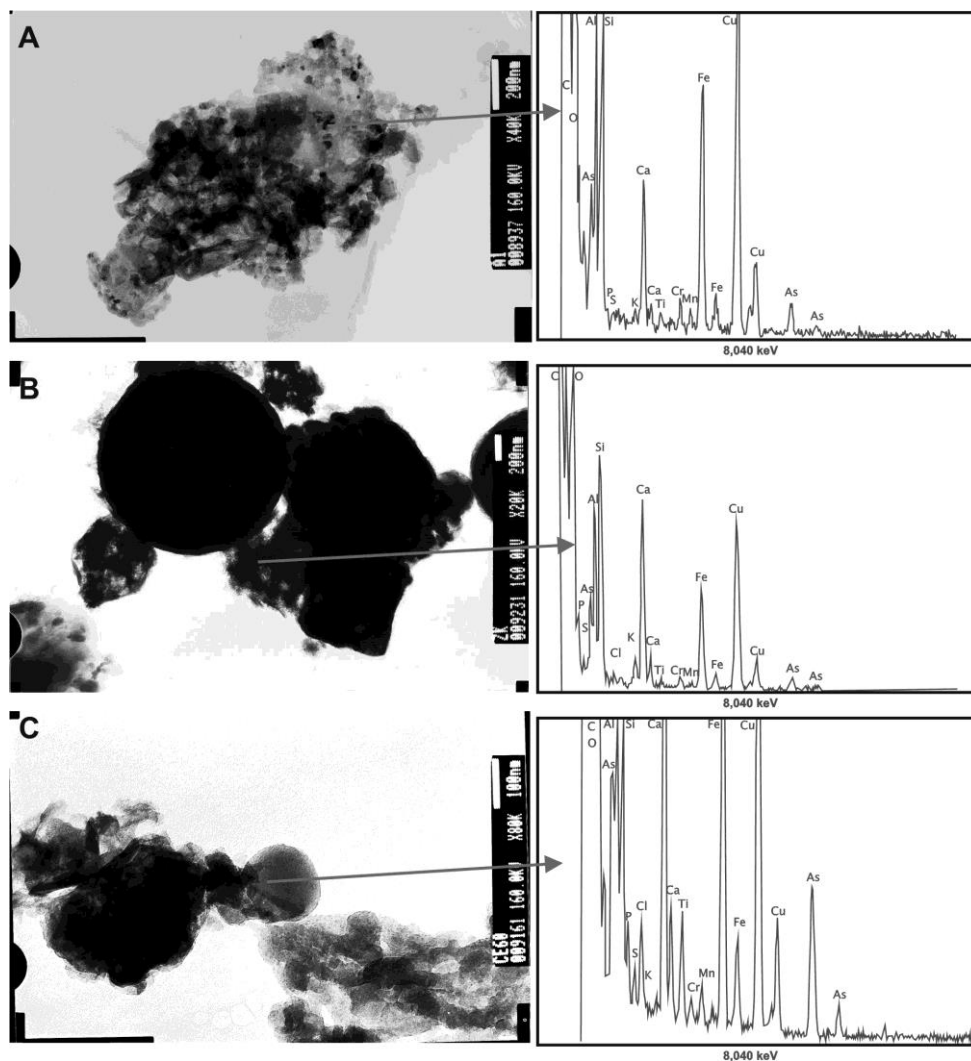
V pôdach regiónu Horná Nitra zanechala havária preukázateľné zmeny. Odhadovaná rozloha kontaminovanej, prevažne poľnohospodárskej pôdy, predstavuje približne 19 000 ha a rieka Nitra sa radí medzi najznečistenejšie rieky v strednej Európe. V rámci remediačných opatrení sa približne 1 m hrubá vrstva naplaveného popola (lokálne aj viac ako 2 m) prekryla cca 30 - 40 cm vrstvou zeminy (**obr. 7**, Veselská et al., 2013). Materiál s vysokým obsahom As bol riekou Nitra rozplavený až do vzdialenosti 100 km.

Pochované antropogénne sedimenty tvoria typ starých záťaží, ktoré možno definovať ako človekom vytvorené objekty v prírodnom prostredí s predpokladaným vplyvom na viaceré zložky životného prostredia. Antropogénne sedimenty podobného charakteru boli v obmedzenom rozsahu predmetom sledovania v rámci Čiastkového monitorovacieho systému (ŠGÚDŠ, ČMS, 2013).

Obr. 7: Modelový pôdny profil s pochovanými popolmi (lokalita Zemianske Kostoľany, Veselská et al., 2013)

Na základe komplexného štúdia pochovaných elektrárenských popolov sa zistilo, že z potenciálne toxických stopových prvkov je v popoloch a v pôdach kontaminovaných popolmi výrazne zvýšený obsah As (od 93 do 1859 mg.kg⁻¹). Čerstvý aj pochovaný elektrárenský popol tvorí hlavne Si, Fe, Al a Ca, ďalej nasledujú Mg, K, Na, Ti a S. K identifikovanými minerálnym fázam v popoloch patrili kremeň, kalcit, mullit, živce, hematit, magnetit, kristobalit, rutil, svetlé sludy, pyrotit, pyrit, montmorillonit a perovskit (Bolanz et al., 2012, Veselská et al., 2013). Dominantnú zložku v reprezentatívnych vzorkách tvoria amorfné aluminosilikátové sklá - v priemere až 74 % a vyznačujú sa variabilným zastúpením Si, Al, Ca a Fe. Tieto sklovité fázy dokážu inkorporovať veľkú paletu potenciálne toxických stopových prvkov a sú hlavnou fázou obsahujúcou As. Najvyššie obsahy As boli zistené v najjemnejšej frakcii vzoriek (< 25 μm), v ktorej sa As viaže na agregáty nanočastíc tvorených Al, Si, Ca a Fe, menej na fázy tvorené Fe a Ca (**obr. 8**). Aj napriek vysokým obsahom As v pôdach bolo na lokalite izolovaných a identifikovaných niekoľko druhov baktérií. Najviac zastúpeným kmeňom bol *Proteobacteria* (60,9 %), kmeň *Firmicutes* tvoril 21,7 % zo všetkých izolátov. Kmeň *Actinobacteria* a kmeň *Bacteroidetes* tvorili zhodne po 8,7 % z izolovaných druhov. Aplikovaním vybraných druhov mikroorganizmov na pevné substráty v biolúhovacích experimentoch sa zistilo, že bioaugmentáciou substrátov autochtónnymi druhmi baktérií sa uvoľnili relatívne nízke obsahy arzénu – v priemere 5,63 hm.% z As_{Tot} v prípade aplikovaného *Pseudomonas chlororaphis* ZK-1. Inokuláciou druhom *Pseudomonas putida* ZK-5 sa uvoľnilo v priemere 9,23 hm.% z As_{Tot}. Relatívne vysoká extrahovateľnosť As bola zistená v prípade aplikovania alochtónneho kmeňa *Rhodococcus degradans* - v priemere takmer 19 hm.% z As_{Tot}. Biostimulácia pre zvýšenie aktivity pôdnej mikroflóry skúmaných pôdno-populových vzoriek sa

najvýraznejšie prejavila v prípade použitia SAB média. Extrahovaný podiel arzénu bol v priemere až 34,73 hm. % z As_{Tot} . Okrem testovaných druhov v štúdií Peťková et al. (2016) existuje mnoho iných mikrobiálnych druhov, ktoré predstavujú účinný nástroj v odstraňovaní arzénu aj prostredníctvom rôznych ďalších mobilizačných alebo imobilizačných procesov. Tieto procesy môžu významne ovplyvniť biologickú dostupnosť a toxicitu arzénu. Výsledky z pilotných laboratórnych experimentov ukázali, že odstraňovanie As vplyvom mikroorganizmov z pôd obsahujúcich popol s vysokými obsahmi As predstavuje účinnú metódu bioremediácie kontaminovaných lokalít.



Obr. 8: Snímky (TEM) agregátov nanočastíc obsahujúcich As a zodpovedajúce EDS analýzy (Peťková et al., 2011)

Riešenie zistených skutočností pre EZ spôsobených banskou a uprávarenskou činnosťou, ako aj v prípade ukladania elektrárenských popolov, je viazané na inovatívne prístupy pri výskume geologických materiálov a inovatívne sanačné opatrenia, ktoré úzko súvisia s rôznymi vedeckými projektami realizovanými v akademickom prostredí ako aj v štátnych rezortných organizáciách (ŠGÚDŠ). Kombinácia získaných výsledkov zo sofistikovaných experimentov, analytických postupov a ich interpretácii, v budúcnosti umožní lepšie charakterizovať šírenie znečistenia na banských EZ ako aj navrhnúť vhodné a efektívne sanačné opatrenia na elimináciu dopadov znečistenia v oblastiach po ťažbe nerastných surovín.

Perspektívnou otázkou v problematike EZ viazaných na banské činnosti je väzba rizikových prvkov na prirodzene sa vyskytujúce geologické substráty alebo na syntetizované fixačné činidlá. Uvedená skutočnosť je dôležitým fenoménom pri vývoji inovatívnych sanačných opatrení zameraných na fixáciu vybraných kontaminantov v pásme prevzdušnenia a v pôdnom profile (Vítková et al., 2018, Faragó et al., 2019), ako aj na vývoj vhodných substrátov do geochemických bariér použiteľných pri

čistení banských vôd. Potenciálna aplikácia činidiel *in situ* v prostredí vyžaduje experimentálne overenie stability pridávaných činidiel do reálnych vzoriek pôd. Stabilizácia kontaminantov v pôdach banských oblastí je jedna z metód, ktoré dokážu eliminovať mobilnú frakciu stopových prvkov, potenciálne kontaminujúcich podzemné vody alebo potenciálne vstupujúcich do pôdnych mikroorganizmov. Použitie vhodných stabilizačných materiálov pri znečistených pôdach v banských oblastiach, vykazujúcich vysokú účinnosť a vyžadujúcich nízke náklady, by mohlo byť v tomto prípade veľmi efektívne.

Výsledky prieskumných a interpretačných prác geologických úloh prieskumu a sanácie environmentálnych záťaží na banských lokalitách, ako aj rôznych vedeckých projektov v posledných rokoch zameraných na štúdium elektrárenských populov (podrobnejšie napr. Jurkovič a Šottník, 2015, Jurkovič et al., 2017) potvrdili charakter geogénno-antropogénnej kontaminácie jednotlivých zložiek životného prostredia anorganickými kontaminantmi (najmä As, Sb, Pb, Zn, Cd, Cu, Cr, Ni, SO₄²⁻) typickými pre opustené banské oblasti. Pre všetky lokality EZ charakteru „banské lokality“, na ktorých prebiehal geologický výskum ako aj podrobný prieskum geologického prostredia sú typické niektoré spoločné charakteristiky, podrobnejšie opísané v práci Jurkovič et al. (2017) - (I) identifikácia primárneho zdroja znečistenia je komplikovaná vzhľadom na charakter a rozsiahle plochy predmetných území, (II) primárnym zdrojom znečistenia sú banské haldy, odvaly, flotačné kaly a ich rozplavovanie a zvetrávanie, (III) kontaminácia pôd/zemín v pásme prevzdušnenia (biologická kontaktná zóna) je výsledkom kombinácie procesov prirodzeného zvetrávania hornín a ťažobných odpadov s vyšším podielom minerálnych fáz obsahujúcich rizikové prvky, (IV) vytekajúce banské vody zo štôlní a drenážne vody z odkalísk predstavujú sekundárny zdroj znečistenia pre povrchové vody, ako aj pre pôdy na predmetných lokalitách, (V) znečistenie na banských lokalitách je často podmienené nevhodným nakladaním s ťažobnými odpadmi.

PodĎakovanie

Práca prezentuje výsledky geologickej úlohy MŽP SR „Prieskum environmentálnych záťaží na vybraných lokalitách Slovenskej republiky“ a výsledky projektov VEGA 1/0597/17 a APVV-17-0317.

LITERATÚRA

- AUXT A., JURKOVIČ Ľ., ŠOTTNÍK P., BAČIK M., SEKULA_{ST.} P., SEKULA_{ML.} P., PEŤKOVÁ K., BRČEKOVÁ J., VOLEKOVÁ B., 2015: Prieskum environmentálnej záťaže KS (012)/Poproč – Petrova dolina (SK/EZ/KS/353). Záverečná správa, MŽP SR, Bratislava, 71 s. + prílohy
- BOLANZ, R.M., MAJZLAN, J., JURKOVIČ, Ľ., GÖTTLICHER, J., 2012: Mineralogy, geochemistry, and arsenic speciation in coal combustion waste from Novaky, Slovakia. *Fuel*. Vol. 94, No. 1, 125-136.
- BRACHTÝR, O., ŠOTTNÍK, P., JURKOVIČ, Ľ., VOZÁR, J., 2019: Mineralogická, geochemická a kvantitatívna charakteristika pevnej fázy transportovanej vo povodiach ovplyvnených banskou činnosťou. In: Těžba a její dopady na životní prostředí VIII, zborník konferencie. *Vodní zdroje Ekomonitor*, 94-96.
- ČMS, 2013: Čiastkový monitorovací systém, Geologické faktory, Podsystem 07: Monitorovanie riečnych sedimentov. Správa za rok 2012 (Kordík, J., Slaninka, I., Bodiš, D.), ŠGÚDŠ, Bratislava, 1-67.
- ČURLÍK, J., 2003: Mapa kontaminácie pôd v regióne Horná Nitra. Záverečná správa, ŠGÚDŠ, Bratislava, 1-69.
- FARAGÓ, T., UŠIAKOVÁ, M., PEŤKOVÁ, K., JURKOVIČ, Ľ., HILLER, E., 2016: Monitoring mobilizácie arzénu v technozemiach pomocou pôdnych lyzimetrov. In: *Inovativní sanační technologie ve výzkumu a praxi 9*. *Vodní zdroje Ekomonitor*, 118-122.
- FARAGÓ, T., VÍTKOVÁ, M., JURKOVIČ, Ľ., SCHWARZKOPFOVÁ, K., HILLER, E., 2019: Využitie nanosorbentov na stabilizáciu arzénu a antimónu pri rôznych pH podmienkach. In: *Geochémia 2019*, ŠGÚDŠ Bratislava, 54-55.
- CHOVAN, M., LALINSKÁ, B., ŠOTTNÍK, P., JURKOVIČ, Ľ., ŽENIŠOVÁ, Z., FLÁKOVÁ, R., KRČMÁŘ, D., LINTNEROVÁ, O., HILLER, E., KLIMKO, T., JANKULÁR, M., HOVORIČ, R., JAŠOVÁ, I., LUX, A., VACULÍK, M., HUDÁČEK, M., MICHŇOVÁ, J., PETRÁK, M., ANDRÁŠ, P., MILOVSKÁ, S., MAJZLAN, J., 2010: Zhodnotenie vplyvu banskej činnosti na okolie opustených Sbložísk Slovenska s návrhmi na remediáciu. Záverečná správa o riešení projektu. Univerzita Komenského v Bratislave, Prírodovedecká fakulta, 1-358.
- HILLER, E., LALINSKÁ-VOLEKOVÁ, B., CHOVAN, M., JURKOVIČ, Ľ., KLIMKO, T., JANKULÁR, M., HOVORIČ, R., ŠOTTNÍK, P., FLÁKOVÁ, R., ŽENIŠOVÁ, Z., ONDREJKOVÁ, I., 2012: Arsenic and antimony contamination of waters, stream sediments and soils in the vicinity of abandoned antimony mines in the Western Carpathians, Slovakia. *Applied Geochemistry*. Vol. 27, Iss. 3, 598-614.
- JÁNOVÁ, V., 2009: Environmentálne záťaže – stav riešenia v Európe a na Slovensku. *Enviromagazín* 14, 4-7.
- JURKOVIČ, Ľ., ŠOTTNÍK, P., FLÁKOVÁ, R., JANKULÁR, M., ŽENIŠOVÁ, Z., VACULÍK, M., 2010: Opustené Sb-ložisko Poproč – zdroj kontaminácie prírodných zložiek v povodí Olšavy. *Mineralia Slovaca*, 42 (2010), 109-120
- JURKOVIČ Ľ., HILLER E., VESELSKÁ V., PEŤKOVÁ K., 2011: Arsenic Concentrations in Soils Impacted by Dam Failure of Coal-Ash Pond in Zemianske Kostolany, Slovakia. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. Vol. 86, No. 4, 433-437.
- JURKOVIČ, Ľ., ŠOTTNÍK, P., 2015: Akademické vzdelávanie a výskum v oblasti environmentálnych záťaží na Slovensku. In: *Environmentálne záťaže*. SAŽP Banská Bystrica, 60-68.
- JURKOVIČ, Ľ., ŠOTTNÍK, P., MAŤOVÁ, V., 2017: Banské lokality na Slovensku – príklady realizovaných prieskumov environmentálnych záťaží a ich sanácií. In: *Znečistené územia 2017*. SAŽP Banská Bystrica, 27-30.
- KALIČIAKOVÁ, E., PACINDOVÁ, N., RAPČIAK, M., SELIGA, J., VOLKO, P., 1996. Poproč – haldy, skládky, odkaliská – VP životné prostredie, stav k 31.1.1994. Záverečná správa. Manuskript – Archív ŠGÚDŠ Bratislava.
- KEEGAN, T., HONG, B., THORNTON, I., FARAGO, M., JAKUBIS, P., JAKUBIS, M., PESCH, B., RANFT, U., NIEUWENHUIJSEN, M.J., THE EXPASCAN STUDY GROUP, 2002: Assessment of environmental arsenic levels in Prievidza district. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12, 3, 179-185.
- KLIMKO, T., CHOVAN, M., HURAIKOVÁ, M., 2010: Hydrotermálne mineralizácie na antimonitových žilách Spišsko-gemerského rudohoria. *Mineralia Slovaca*, 41, 2, (2009), 115-132.
- KULIKOVA, T., JURKOVIČ, Ľ., FARAGÓ, T., 2019: Štúdium správania sa ortuti, chrómu a niklu v pôdach opusteného banského areálu Merník (východné Slovensko) pomocou extrakčných experimentov. *Phytopedon (Bratislava)* (in press)
- PALUCHOVÁ, K. ET AL., 2008: Systematická identifikácia environmentálnych záťaží SR. SAŽP Banská Bystrica, Manuskript, www.sazp.sk/public/index/go.php?id=2467

- PEŤKOVÁ, K., LALINSKÁ-VOLEKOVÁ, B., JURKOVIČ, Ľ., VESELSKÁ, V., 2011: Chemické a minerálne zloženie elektrárenských populov (lokalita Zemianske Kostolany). *Mineralia Slovaca*, 43, 4, 377-386.
- PEŤKOVÁ, K., JURKOVIČ, Ľ., VOJTKOVÁ, H., 2016: Bioremediačný potenciál baktérií v uvoľňovaní arzenu z pochovaných elektrárenských populov. *Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, Hornicko-geologická fakulta, Institut environmentálneho inžinýrství*. 148 s.
- SCHWARZKOPFOVÁ, K., FARAGO, T., JURKOVIČ, Ľ., 2018: Arsenic mobilization from technosols using long-term column study (model environmental burden). *Toxicological & Environmental Chemistry*, Vol 100, 2, 157-174.
- SEKULA, P., HILLER, E., ŠOTTNÍK, P., JURKOVIČ, Ľ., KLIMKO, T., VOZÁR, J., 2018. Removal of antimony and arsenic from circum-neutral mine drainage in Poproč, Slovakia: a field treatment system using low-cost iron-based material. *Environmental Earth Sciences*. Vol. 77, 13 (Art. No. 518), 1-14.
- SLOVENSKÁ ENERGETIKA, 2011: Z odpadu cenný produkt. *Slovenské elektrárne*, 6, 36, 1-3.
- SMERNICA MINISTERSTVA ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA SR Č. 1/2015–7 z 28.januára 2015 na vypracovanie analýzy rizika znečisteného územia. MŽP SR, Bratislava, 1-96.
- ŠIMONVIČOVÁ, A., PEŤKOVÁ, K., JURKOVIČ, Ľ., FERIANC, P., VOJTKOVÁ, H., REMENÁR, P., KRAKOVÁ, L., PANGALLO, D., HILLER, E., ČERŇANSKÝ, S. (2016): Autochthonous microbiota in arsenic-bearing technosols from Zemianske Kostoľany (Slovakia) and its potential for bioleaching and biovolatilization of arsenic. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227, 9, art. no. 336.
- ŠOTTNÍK, P., JURKOVIČ, Ľ., HILLER, E., KORDÍK, J., SLANINKA, I., 2015: Environmentálne záťaž. *Vysokoškolská učebnica. Slovenská agentúra životného prostredia, Banská Bystrica*, 301 s.
- VESELSKÁ, V., MAJZLAN, J., HILLER, E., PEŤKOVÁ, K., JURKOVIČ, Ľ., ĎURŽA, O., LALINSKÁ-VOLEKOVÁ, B., 2013: Geochemical characterization of arsenic-rich coal-combustion ashes buried under agricultural soils and the release of arsenic. *Applied Geochemistry*. Vol. 33, 153–164
- VÍTKOVÁ, M., PUSCHENREITER, M., KOMÁREK, M., 2018: Effect of nano zero-valent iron application on As, Cd, Pb, and Zn availability in the rhizosphere of metal(loid)contaminated soils. *Chemosphere*, 200, 217-226
- ZÁKON NR SR Č. 569/2007 Z. z. o geologických prácach (geologický zákon) v znení neskorších predpisov.