

Új módszerek és eszközök alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata talajszennyezések kockázatának feltárásában

Szűcs-Vásárhelyi Nóra^{1,2*}, Dobor József³, Pátzay György^{3,4}, Rékási Márk¹

¹HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani Intézet, Budapest, Magyarország

²Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Hadtudományi és Honvédtisztviselői Kar, Katonai Műszaki Doktori Iskola, Budapest, Magyarország

³Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Rendészettudományi Kar, Katasztrófavédelmi Intézet Iparbiztonsági Tanszék, Budapest, Magyarország

⁴Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék, Budapest, Magyarország

*Levelező szerző, e-mail: vasarhelyi.nora@atk.hun-ren.hu

Beérkezett: 2023. december 18.; elfogadva: 2024. január 16.; online megjelent: 2024. november 11.

Összefoglalás

A talajokat érintő káresemények hatékony kezelése nemzetvédelmi szempontból alapvető jelentőséggel bír. Egy ilyen helyzetben a döntéshozatalt elősegítő, a szennyezés felmérésére és a kárhely *in situ* vizsgálatára alkalmas, gyors eljárásra lenne szükség, a talajegészségre vonatkozó adatok interpretációjával kiegészítve. A proximal soil sensing (PSS) és az ökotoxikológia kombinálása a talajbiztonság területén új, optimalizált megközelítést jelent. A kutatás során *in situ* alkalmazható, roncsolásmentes eszközöket (ún. proximal soil sensing) használtunk a kijelölt mintaterületen. A talaj-ökoszisztéma érzékenységeinek vizsgálatára ökotoxikológiai tesztek, talajoszlop- és mikrokozmosz-kísérleteket állítottunk be.

Kulcsszavak: ökotoxikológia, proximal soil sensing, dozimetria, talajszennyezés, talajbiztonság

Examining the application possibilities of new methods and tools in exploring soil pollution risks

Nóra Szűcs-Vásárhelyi^{1,2}, József Dobor³, György Pátzay^{3,4}, Márk Rékási¹

¹HUN-REN Centre for Agricultural Research, Institute for Soil Sciences, Budapest, Hungary

²Ludovika University of Public Service, Faculty of Military Science and Officer Training, Doctoral School of Military Engineering, Budapest, Hungary

³Ludovika University of Public Service, Faculty of Law Enforcement, Institute of Disaster Management, Department of Industrial Safety, Budapest, Hungary

⁴Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Chemical Technology and Biotechnology, Department of Chemical and Environmental Process Engineering, Budapest, Hungary

Summary

The effective management of environmental damage incidents affecting soils is of fundamental importance from the aspects of national defence. In such a case, chemical analytical methods are used to assess the pollution, which, although accurate, are time-consuming, expensive, and do not provide enough information about the state of the pedosphere. Quick decision-making is of particular importance in disaster situations; therefore, a quick procedure

suitable for *in situ* examination of the damage site, supplemented with the interpretation of soil health data, would be necessary. The combination of proximal soil sensing (PSS) and ecotoxicological methods represents a new, optimized approach in the field of soil safety. In our research, we used *in situ*, non-destructive (proximal soil sensing) devices in the designated military sample area. To detect the radiation of the ground we used aerial remote sensing, with the application of a radiation measuring device attached to an unmanned aerial vehicle (UAV). For the measurement of the potentially toxic element content, we applied a handheld X-ray fluorescence spectrometer (PXRF). To examine the sensitivity of the soil ecosystem, we set up ecotoxicological tests, soil column and microcosm experiments. Our goal is to (1) implement a development that promotes the effective functioning of disaster prevention agencies, (2) modernize the procedures aimed at reducing individual risk, and (3) put emphasis on pedosphere ecosystem sensitivity testing in disaster prevention during the execution of operations. With our research, we would like to contribute to the development of the methodology for the qualification of the damage site, to the minimization of high individual risk during the detection of radiation, and to the support of impact-based decisions when evaluating the state of the damage site.

Keywords: ecotoxicology, proximal soil sensing, dosimetry, soil pollution, soil safety

Előszó

A HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani Intézete évtizedes múltra visszatekintően foglalkozik földközeli távérzékelési módszerekkel, illetve roncsolásmentes analitikai eljárásokkal. A Kooperatív Doktori Programban megvalósítandó kutatás témájában – ezeknek a módszereknek az alkalmazása talajszennyezéssel járó káresemények felderítésére és monitorozására, elsősorban katonai tevékenység által érintett területeken – azonban még nem folytak ilyen irányú kutatások. A fenti eljárások mellett a szennyezések környezeti kockázatát ökotoxikológiai vizsgálatokkal kiegészítve komplex képet kaphatunk a talajszennyezés várható hatásairól, megalapozva a beavatkozás esetén alkalmazható kármentesítési eljárásokat. A munka az Aszódon található Petőfi Sándor laktanya területén végzett helyszíni mérések és ottani minták laboratóriumi analízisének összevetésén, illetve laboratóriumi modellkísérletek értékelésén alapul. A folyamatban lévő adatértékelés eredményeként megismerhető a talajok szénhidrogén-vegyületekkel és potenciálisan toxikus elemekkel történő egyidejű szennyezésének hatása, illetve szerves és radioaktív szennyezés esetén a hagyományos mérési módszerek korszerűbb eljárásokkal való kiváltásának elemzése történik.

Dr. Rékási Márk PhD

HUN-REN Agrártudományi Kutatóközpont,

Talajtani Intézet,

Talajkémiai és Anyagforgalmi Osztály, osztályvezető

Jelen kutatás fő értéke az a felismerés, hogy a károk felderítéséhez az említett területek módszereit kombinált, komplex módon kell alkalmazni, amelyek tartalmazzák a talajok, talajvizek szennyeződéseinek analízisét, felhasználva az *in situ* és mintavételes elemzések rendszerét. Ennek tipikus példája a talajok radioaktív szennyezettségének felmérése alkalmazott légi drónos mérések és a talajmintafuratok elemzéseinek kombinált alkalmazása. A kutatómunka során a talajok biológiai értékelésében felhasznált komplex elemzések ugyancsak ezt az új szemléletet jelzik. Egy káresemény során a talajszennyezés fel-

mérésére hazánkban kémiai analitikai módszereket alkalmaznak, amelyek ugyan pontos eredményt adnak, viszont nagyon időigényesek, költségesek, nem környezetbarátak, és önmagukban nem szolgálnak elegendő információval a pedoszféra állapotáról. A kárhely *in situ* vizsgálatára alkalmas, gyors eljárás alkalmazására lenne szükség, a talajegészségre vonatkozó adatok interpretációjával kiegészítve. A proximal soil sensing és az ökotoxikológia kombinálása a talajbiztonság területén új, optimalizált megközelítést jelent. Jelen kutatási beszámoló a katasztrófavédelmi eljárások, technológiák fejlesztését célzó és a nemzetbiztonsági szempontból kritikus infrastruktúrák védelmét célzó támogatott kutatások területére tartozik. Értékes adalékokkal szolgál a jövőben végzett környezetbiztonsági elemzésekhez és az azokat követő kárfelszámoláshoz.

Prof. dr. Pátzay György PhD

Nemzeti Közszerződési Egyetem,

Rendészettudományi Kar,

Katasztrófavédelmi Intézet, Iparbiztonsági Tanszék;

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,

Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék

Bevezetés

Egy váratlanul bekövetkező katasztrófa esetén a kárhelyszínen minden esetben az emberi élet mentése az elsődleges feladat. Azonban egy katasztrófa az emberi élet veszélyeztetése mellett komolyan károsíthatja a környezetet is, ami közvetett módon kihat az emberekre. Jó példa erre a 2010 októberében bekövetkezett hazai vörösszap-katasztrófa, amikor a MAL Zrt. területén lévő vörösszap-zagytározó egyik kazettájának gátja átszakadt, aminek következtében vörösszap és lúgos víz 1,7 millió köbméternyi elegye öntötte el a környező településeket és mezőgazdasági területeket. A káresemény során tíz ember meghalt, 286 pedig megsérült. Közel 340 épület szenvedett károkat, és 1017 hektár mezőgazdasági terület szennyeződött. A Torna patak élővilága kipusztult (*Ambrusz–Muhoray 2015*). 2000 januárjában a

romániai Aurul nagybányai üzemében történt gátszakadás, amelynek következtében 100 ezer m³ cianid- és nehézfém tartalmú szennyvíz ömlött a Lápos folyóba, majd onnan a Szamosba és a Tiszába. A felszíni vízbe került szennyező anyag koncentrációja a határérték 180-szorosát is meghaladta. A szennyezés hatására az érintett folyók magyarországi szakaszán körülbelül 1240 tonna hal pusztult el (Czibolya 2015).

A fenti példákból is jól látható, hogy a szennyező anyagok a talajba vagy a felszín alatti vízbe kerülve komoly környezeti és egészségügyi kockázatot jelentenek. A szennyezés káros hatással van a talajegészségre, és befolyásolja a talaj ökoszisztéma-szolgáltatásokat nyújtó képességét (Fernandez-Lopez-Posada-Baquero-Ortega-Calvo 2022; Narbuvayevna et al. 2022; Thestorff-Makki 2022; Fathi 2023; Pereira et al. 2018; Brevik et al. 2018). Ezért a káresemény mentési és védekezési feladatainak végrehajtásához szükséges tevékenységek mellett kiemelt célként kell kezelni a környezeti károk csökkentését és a szennyezés terjedésének megakadályozását.

A napjainkban egyre inkább jellemző szélsőséges környezeti hatások veszélyeztetik a talajtakaró (pedoszféra) állapotát, és kezelésük komoly kihívás elé állíthatja a katasztrófavédelmi szervezeteket (Hábermayer et al. 2019). A katasztrófák hatékony kezeléséhez – a szakmai szervezetek részéről felmerülő tervezési, hatósági és operatív feladatok térinformatikai kiszolgálását célzó fejlesztések kiegészítéseként – szükség van a katasztrófákhoz kapcsolódó egyéni kockázati tényezők minimalizálására, a megelőzést és a felkészülést támogató eszközök meghatározására és rendszerbe állítására, illetve a pedoszféra védelmére irányuló változtatásokra egyaránt. A talajtani kutatások és a technológia fejlődése eredményeként ma már korszerű, gyors és a helyszíni vizsgálatokat is lehetővé tevő eszközök, illetve módszerek állnak rendelkezésre, amelyek adott esetben alkalmasak lehetnek egy kárhely *in situ* vizsgálatára.

A talajt is érintő problémák – úgymint az éghajlatváltozás, a fenntartható mezőgazdaság problémaköre vagy a szennyezett földterületek felmérése és helyreállítása – új megközelítést igényelnek. A növekvő igények kielégítésére világszerte számos kutatás zajlik a jó minőségű és olcsó talajinformációk mérési lehetőségeivel kapcsolatban. Térinformatikai feldolgozásra és kockázatbecslésre alkalmas, nagyszámú adat keletkezik a légi távérzékelés és a felszínközeli roncsolásmentes vizsgálatok, az úgynevezett *proximal soil sensing* (PSS) során. Ezek a módszerek költséghatékonyak, nem járnak a talaj bolygatásával, de nagy területi lefedettséget biztosítanak. A vizsgálatokból származó adatok digitális formában, térbeli, spektrális és időbeli felbontásban keletkeznek (Pásztor-Takács 2014).

A felszínközeli roncsolásmentes eszközök az egyes talajtulajdonságok érzékelésére alkalmas szenzorokat használnak, amelyek kvantitatív eredményeket adnak, pontosak és energiahatékonyak, adott esetben vezeték nélküliek és hordozhatók is lehetnek. A PSS-műszerek beépített

szenzorai segítségével közvetlenül a talajfelszínnel érintkezve vagy ahhoz közel képesek mérni a talaj adott paramétereit (Viscarra Rossel et al. 2011). A PSS-műszerek lényege, hogy azonnal, már a helyszínen a területre vonatkozó adatokhoz jutunk a talaj bolygatása nélkül, ezért ezek a módszerek alkalmasak lehetnek a kárhely előzetes felmérésére, így támogatva a szükséges beavatkozásra vonatkozó döntést, és csökkentve az esetleges kockázatokat.

Kutatásunk elsődleges célja a talajtudományban alkalmazott felszínközeli, roncsolásmentes felvételezés és bizonyos ökotoxikológiai módszerek adaptálása a katasztrófavédelmi eljárásokba, segítve ezzel a kockázatértékelést és a döntéstámogató rendszerek hatékony működését. A kutatás részeként két kísérlet (talajoszlop és mikrokozmosz) beállítását, valamint a választott mintaterületen gyűjtött talajminták roncsolásmentes és ökotoxikológiai vizsgálatát terveztük meg. A vizsgálatok a sugárzásszennyezés és a kémiai szennyezés vizsgálati módszereinek optimalizálására fókuszálnak.

Ionizáló sugárzás detektálása

Az embert érő sugárzás természetes háttérsugárzásból és antropogén forrásból származhat. A természetes radioaktív anyagok megtalálhatóak a vízben, a levegőben, a talajban és a kőzetekben (Rasha 2020). A természetes radioaktivitás mellett egyre szélesebb körű a sugárzó anyagok emberi alkalmazása például az orvostudományban, az energiaiparban vagy különböző polgári és katonai létesítményekben. Jó példa az emberi felhasználás következtében a környezetbe jutó radioaktív szennyező anyagra a csernobili katasztrófa, illetve a kísérleti atomrobbantások eredményeként a környezetbe kerülő cézium (¹³⁷Cs) (Beck-Bennett 2002; Ramzaev et al. 2007; Zhidkin et al. 2020). A növekvő felhasználással párhuzamosan nőtt a balesetek, illetve a jogtalan vagy rosszindulatú felhasználások száma is. Kínában 2004 és 2015 között 253 sugárbaesetet jelentettek (Gong et al. 2019). A Nemzetközi Atomenergia-ügynökség (IAEA) adatbázisba gyűjti (Esemény és Tiltott Kereskedelmi Adatbázis, ITDB) a radioaktív anyagokhoz köthető szokatlan eseményeket és incidenseket (például elvesztés, sugárzó anyaggal történő visszaélés, lopás, csempészet). Az 1993 és 2019 közötti időszakból 3686 bejelentett esetről számolnak be, amelyek közül 290 igazoltan illegális tevékenységhez volt köthető (IAEA 2020). Hazánkban is egyre gyakrabban fordul elő radioaktív anyagok jelenléte bűnügyi helyszíneken (Kovács-Széles et al. 2020).

A környezeti sugárzások detektálására főként gamma-spektrométereket használnak. A spektrométerben lévő detektor az atommagban lejátszódó valamely folyamat (fotoeffektus, Compton-effektus, párkeltés) eredményeként kilépő gamma-sugárzás energiáját méri. Ezek a műszerek nagy hatásfokkal, többségében energiaszelektív módon mérnek, viszont jellemzően laboratóriumi felhasználásuk terjedt el. A terepi használatra kifejlesztett

spektrométerek ugyan már hordozhatók, viszont működtetésükhöz szükség van a kezelő személyzet jelenlétére, ami humán-egészségügyi kockázatokkal járhat (Pöllänen *et al.* 2009).

Távérzékeléssel közvetlen kapcsolat nélkül nyerhetünk információt a vizsgálni kívánt terület vagy objektum egy jellemző paraméterére vonatkozóan (Khorram *et al.* 2012). Ezek az eszközök a kibocsátott vagy visszavert elektromágneses sugárzást detektálják aktív (önmaga által kibocsátott sugárzás reflektanciáját detektálja; pl. LiDAR) vagy passzív (a Nap sugárzásának visszaverődését detektálja; pl. optikai műholdak) szenzorok segítségével, ami az adott anyag/tárgy sajátja (Cracknell 2007; Pásztor–Takács 2014). A szenzorokat földi, műholdas vagy légi platformokra (pl. drón) telepítik, amelyek analóg vagy digitális kép formájában tárolják a mért spektrális információt. Az alkalmazott platform típusát a kívánt térbeli és időbeli felbontás, illetve a földrajzi kiterjedés határozza meg (Rhodes *et al.* 2022).

Kutatásunkban UAV-ra rögzített sugárázmérő eszközzel vizsgáltuk a kiválasztott mintaterületet. Vizsgálataink során feltételeztük, hogy az UAV és a proximal soil sensing módszerek kombinálásával – a nagy területi lefedettség és a mérés során keletkező nagy mennyiségű adat okán – minimalizálható a nehezen megközelíthető, veszélyes terület okozta magas egyéni kockázat a sugárzás detektálása közben.

Szervetlen talajszennyezők mérése

A talajtani kutatások eddigi eredményei az elmúlt évtizedek terepi felméréseiből és kémiai, fizikai, ásvány- és kőzettani, valamint biológiai laboratóriumi vizsgálataiból származnak. A minták laboratóriumi elemzésére alkalmas műszerek közül az egyik az induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrometria (ICP-OES).

Az ICP-OES módszer folyékony és szilárd halmazállapotú minták multieleemes analízisére szolgál. A módszer lényege, hogy induktív csatolású plazma-sugárforrás segítségével gerjesztett atomokat és ionokat hozunk létre, amelyek aztán az adott kémiai elemre jellemző hullámhosszúságú elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. Az emittált sugárzás adott hullámhosszon mérhető intenzitása a meghatározandó kémiai elem mintabeli koncentrációjával arányos (Olesik 1991). Az analízishez savas feltárással kell kioldani a mintából az elemeket. Az efféle roncsolásos technika a hosszú minta-előkészítés miatt rendkívül időigényes, így egy-egy elemzés a mintaszámtól függően akár hetekbe is telhet.

A röntgen-fluoreszcens (XRF) analízis egy elemi összetétel meghatározására szolgáló, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer. Az XRF-készülék röntgensugárzással gerjeszti az atomokat, és rögzíti a kilépő röntgensugárzás-kaskád vonalainak (csúcsainak) energiáját és intenzitását. A detektált fluoreszcencia-energia minden elem esetében egyedi spektrumot eredményez, amelynek segítségével azonosítható az adott elem.

A fluoreszcens fotonok detektálása lehetővé teszi a minta elemtartalmának mennyiségi és minőségi elemzését is (Kalnicky–Singhvi 2001). Ez a technológia lehetővé teszi, hogy kis méretű hordozható készülékbe kerüljön – ellentétben az ICP-technikával. A hordozható röntgen-fluoreszcencia spektrométerek (pXRF) előnye a hordozhatóságon és a roncsolásmentes vizsgálat lehetőségén túl, hogy gyors, többelemes analízist tesznek lehetővé minta-előkészítés nélkül vagy minimális minta-előkészítést követően (Hou–He–Jones 2004). Hátrányuk azonban, hogy a műszer elemenkénti kimutatási határa és a zavaró tényezők (spektrális interferenciák) befolyásolhatják a mérés pontosságát (Hall *et al.* 2014). Horta és Stockmann kutatásaikban úgy találták, hogy a hordozható XRF-eszközök jó analitikai pontossággal és nagy hatékonysággal használhatók a talaj elemtartalmának vizsgálatára, így valós alternatívái lehetnek a laboratóriumi analitikai vizsgálatoknak (Horta *et al.* 2015; Stockmann *et al.* 2016).

Kutatásunkban a pXRF katasztrófavédelemben való alkalmazhatóságát vizsgáljuk a kárhely előzetes felmérésére vonatkozóan. Feltételezzük, hogy a komplex módon alkalmazott proximal soil sensing módszerek csökkentik a felderítés során mért paraméterek meghatározásának bizonytalanságát, így alapot adva a kárhely minősítéséhez és a későbbi beavatkozás szükségességének megállapításához. Vizsgálatainkkal a katasztrófa-helyzetek döntéstámogatására szolgáló ajánlások kidolgozása a célunk.

Ökotoxikológia

Egy káresemény során azonban nem elég a talaj fizikai kémiai tulajdonságainak vizsgálatára szorítkozni. A kémiai analitikai módszerek alkalmasak a szennyezők feltárás utáni koncentrációjának meghatározására, viszont nem tájékoztatnak a biológiai hozzáférhetőségtől függő aktuális toxicitásról és az esetleg jelen lévő egyéb veszélyes anyagokról, amelyek kölcsönhatásba léphetnek a szennyező anyaggal, illetve nem veszik figyelembe a biodegradáció folyamán keletkező bomlásterméket, amely adott esetben reaktívabb lehet, mint maga a kiindulási anyag. Ezen okok miatt szükséges a szennyezett talajok vizsgálata során a kémiai és az ökotoxikológiai módszerek együttes alkalmazása (Gruiz *et al.* 2001).

Az ökotoxikológia a környezetre potenciálisan veszélyes anyagoknak az ökoszisztéma tagjaira gyakorolt hatásaival foglalkozó tudományág, amelynek eredete az 1970-es évekre nyúlik vissza. A tudományterület kezdetben csupán a vízi ökoszisztémák vizsgálatával foglalkozott. Az 1970-es években részletes ajánlásokat dolgoztak ki a halak, a vízi gerinctelenek és az algák vizsgálatára. Az első talajspecifikus standardizált vizsgálati módszert az 1990-es években adták ki a giliszták toxicitásvizsgálatára vonatkozóan (Hund–Rinke–Wiechering 2001; van Straalen 2002). Manapság már számos tesztszervezetre kidolgozott ajánlás elérhető (Alves–Cardoso 2016), ennek ellenére az ökotoxikológia talajvizsgálatokkal foglalkozó

ága még mindig nem teljesen értette meg a talajtani összefüggéseket. A tesztelés célja a vegyi anyagok, keverékek, hulladékok és környezeti minták toxicitásának, mutagenitásának, teratogenitásának vizsgálata. Az ökotoxikológiai tesztek eredményéből következtethetünk a vizsgált anyag emberre és ökoszisztémára gyakorolt hatására, illetve meghatározhatjuk az adott anyag környezeti kockázatának mértékét. A környezeti minőségi kritériumok, illetve a szennyező anyagokra vonatkozó határértékek megállapítása a szennyező anyag hatása alapján, azaz a dózis–válasz/koncentráció–válasz összefüggések ismeretében meghatározott, káros hatást még nem okozó környezeti koncentráció alapján történhet meg (Gruiz–Meggyes–Fenyvesi 2015; Gruiz–Horváth–Molnár 2001). Az ökotoxikológiai tesztek többféle szempont szerint csoportosíthatjuk. A fajok száma szerint megkülönböztetünk egy, illetve több fajt alkalmazó tesztek. A tesztorganizmus lehet baktérium, gomba, alga, növény vagy állat. A tesztek vonatkozhatnak a vízi vagy a szárazföldi ökoszisztémára, az expozíció pedig történhet a test teljes felületén, táplálékfelvétellel vagy a minta gyomorba juttatásával. A teszt időtartama szerint lehet rövid idejű (akut) vagy hosszú idejű (krónikus). Típusuk alapján megkülönböztetünk laboratóriumi (akut, krónikus), mikrokozmosz, mezokozmosz (több fajt alkalmazó teszt), biodegradációs és bioakkumulációs tesztek. A leggyakoribb mérési végpontok az alábbiak.

- Toxicitási tesztek: növekedés (sejtszám, tömeg, gyökérhossz), túlélés, halál; légzés: O_2 -fogyasztás, CO_2 -termelés; enzimaktivitások, ATP-termelés, szaporodás, lumineszkálás stb.
- Biodegradációs tesztek: O_2 -fogyasztás, szubsztrát-fogyás.
- Bioakkumulációs tesztek: az akkumulált vegyi anyag kémiai analízise.

Az ökológiai kockázatbecslés talajtani aspektusát szeretnénk hangsúlyozni ökotoxikológiai tesztekkel. Ezek olyan területek vizsgálatánál előnyösek, ahol nem ismerjük a szennyező anyag összetételét, minőségét, eloszlását vagy a különféle káros anyagok egymásra hatását. Feltételezzük, hogy komplex szennyezés esetén az ökotoxikológiai tesztek alkalmazásával pontosabb és érzékenyebb becslést kapunk az ökoszisztéma állapotáról, mint ha csupán fizikai kémiai analitikai módszereket alkalmazunk.

Vizsgálati anyag és módszer

A helyszín jellemzése

Kutatásunkhoz az aszódi Petőfi Sándor laktanyát (47.65201, 19.50407) választottuk kísérleti helyszínnek. A területen több mint százhatvan évig katonai tevékenység folyt, egészen annak 2005-ös bezárásáig. A laktanyában ez idő alatt különböző alakulatok állomásoztak, ami alkalmassá teszi a helyszínt több szennyezőanyag-

típus talajbéli viselkedésének tanulmányozására. A terület használatot és a vizsgálatokat a HM Védelemgazdasági Hivatal engedélyezte.

Mintavétel

A mintaterületről mintavételi terv alapján hat különböző helyszínen gyűjtöttünk talajmintát. A mintavételeket feltáró mélyfúrással végeztük el, egy ismétlésben 6 méter mélységig. Összesen 96 db bolygatott talajmintát gyűjtöttünk. Az így gyűjtött mintákat zacskóztuk, azonosító címkével láttuk el, majd előkészítettük a laboratóriumi analízisre. A mintákat az előkészítés során kiszárítottuk, megőröltük, végül 2 mm-es szitán átszitáltuk.

Az általunk tervezett talajoszlop- és mikrokozmoszkísérlet beállításához modelltalajt gyűjtöttünk a területnek a mintavételi helyektől egy távolabb eső pontján. A kísérletekben felhasznált modelltalaj két rétegből, 0–30 cm-ből és 30–60 cm-ből származik.

Terepi mérések

Röntgen-fluoreszcens (XRF) analízis

A mérésekhez használt Olympus Delta Professional hordozható, kézi XRF 36 elem koncentrációjának mérésére alkalmas. Az XRF által mért talajelem-koncentrációk felhasználhatók a talaj kémiai és fizikai tulajdonságainak megjósolására és a pedogén folyamatok elemzésére (Weindorf et al. 2012). A mérendő mintákat háromféleképpen vizsgálhatjuk. Az *in situ* elemzéseknél a helyszínen történik a mérés, az XRF-et közvetlenül a talajra helyezve. A pontos méréshez a takarónövényeket és egyéb tárgyakat el kell távolítani a felületről. A mintavételt követően a gyűjtött talajminták zacskózott állapotban is lemérhetők. A zacskón keresztüli vizsgálat a mért elemek többségénél nem befolyásolja az eredményt, kivéve a Cr, V és Ba esetében, amelyeknél ~ 20–30 százalékkal alacsonyabb mért eredményekre kell számítani. A harmadik vizsgálati módszer során a mintákat előkészítés után mérik. A gyűjtött talajmintákat a mintától függően a mérés előtt szárítani, szitálni és őrölni kell, majd ezt követően speciális mintatartóba vagy zacskóba helyezve elemzik. Ez a vizsgálati eljárás biztosítja a legnagyobb pontosságot abban az esetben, ha egységes, homogén mintákat analizálunk. Minőségbiztosítási szempontból mindhárom vizsgálati mód esetében javasolt a műszer rendszeres kalibrálása, ~ 20 mintánként vakpróba elvégzése és a mért minták egy részének (≥ 5 százalék) laboratóriumi elemzése (Peinado et al. 2010; Rouillon–Taylor 2016).

Kutatásunk során a laktanyában gyűjtött és előkészített 96 minta elemtartalmát vizsgáltuk kézi, hordozható XRF készülékkel. A minták előkészítését az *in situ* helyszíni vizsgálattal szemben az indokolta, hogy az így kapott eredmény pontosabb, mint a helyszíni mérésekből származó adatok, ezért könnyebben összevethető az ICP-OES által mért adatokkal. A műszerrel 'SOIL'

módban, 60 másodperces mérési időre állítva mértünk. A mintákat speciális mintatartóba helyeztük, majd a mérés előtt tömörítettük. A mérések megkezdése előtt a műszert kalibráltuk. Minden 16 mérést követően vakpróbát, majd sztenderd mérést végeztünk. A mért eredmények pontosságát ICP-OES-sel ellenőriztük.

Felszínközeli távérzékelés UAV segítségével

A sugárzás mérésére pilóta nélküli légi járműre (UAV) rögzített sugárzásmérő műszert használtunk. Az UAV használatával minimalizálható a nehezen megközelíthető vagy veszélyes terület okozta magas egyéni kockázat.

A sugárzás detektálásához Safecast bGeigie Nano sugárzásmérőt használtunk a kijelölt mintaterületen. A bGeigie Nano egy mobil, memóriával és GPS-szel ellátott sugárzásmérő. A műszer használható pontszerű mérésekre és nagy területű szennyezések megállapítására egyaránt. Az eszköz öt másodpercenként rögzíti a mért értéket a hozzá tartozó idő- és helykoordinátákkal (Walsh et al. 2019).

A radiológiai felmérést két szakaszban végeztük. Először a Safecastot kézben, a felszínhez közel tartva bejártuk a laktanya területét. A földi felvételezést követően az eszközt UAV-ra erősítettük, és lerepültük a területet. A detektált adatokat később QGIS segítségével georeferáltuk. A mért értékek validálásához a laktanya területéről gyűjtött 96 darab fűrt mintát a BME Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék Energia-, víztechnológia és izotóptechnika csoportjának laborjában analízáltuk gamma-spektroszkóp segítségével.

Kísérletek

Talajoszlop-kísérlet

Az általam felállított talajoszlop-kísérletben potenciálisan toxikus elemek vertikális mozgását modelleztük antropogén hatás alatt álló talajban, szerves szennyező anyag jelenléte mellett. Feltételeztük, hogy a TPH-vegyületek vagy azok bomlástermékei komplexképzés révén módosítják a réz/cink mobilitását a talajban. A kísérletben felhasznált modelltalajt a laktanya területéről származó, szennyező hatásnak kevésbé kitett területről gyűjtöttük. A talajoszlopokba két rétegben töltöttük be a talajt. A felső réteghez kétféle koncentrációban adagoltunk cink- és réz-szulfátot, valamint szénhidrogént (TPH). Összesen 39 oszlopot állítottunk fel, majd az inkubációs idő letelte után öt csapadékeseményt szimuláltunk. A kísérlet végén elemezni fogjuk a csurgalékvíz, illetve a talajrétegek TPH- és elemtartalmát, illetve ökotoxikológiai tesztekkel a szennyezés környezetre gyakorolt hatását vizsgáljuk.

Mikrokozmosz-kísérlet

A mikrokozmosz-kísérlet beállításával a szerves szennyezők (TPH) és a potenciálisan toxikus elemek (Cu, Zn) hatását vizsgáltuk a talaj-ökoszisztéma érzékenységére vonatkozóan. A kísérletben a talajoszlopoknál is alkalma-

zott szennyezőanyag-kombinációkat kevertünk a talajhoz, amit aztán 1 kg-os tenyészedényekbe töltöttünk. A bekeverést inkubációs periódus követte, amely után teszt növényként angol perje (*Lolium perenne*) került vetésre. A kísérletet klímaszekrényben állítottuk be, így szabályozva a sötét és világos periódusokat, illetve a páratartalmat és a hőmérsékletet. A tenyészidőszak alatt a talaj nedvességtartalmát a szabadföldi vízkapacitás 60 százalékán tartottuk. A kísérlet ideje alatt kétszer vettünk mintát a teszt növényből, hogy megállapítsuk a szennyezők biomasszatömegre gyakorolt hatását. A növényi anyag mellett a talajminták fizikai kémiai paramétereit és elemtartalmát is analízáltuk.

Laborvizsgálatok

A labormérések során a laktanyában gyűjtött talajminták, a modelltalaj, illetve a két beállított kísérlet bontása után vett talajminták általános talajkémiai paramétereit (pH, kötöttség, sótartalom, humusztartalom, CaCO₃-tartalom), illetve az elemtartalmukat és a TPH-tartalmukat mértük meg.

A talajoszlop-kísérletben gyűjtött csurgalékvíz-minták vízkémiai paramétereit (pH, fajlagos elektromos vezetőképesség, kation-/aniontartalom, NH₄-N, NO₃+NO₂+N), valamint az elemtartalmat és a TPH-tartalmat határoztuk meg.

ICP-OES

Az elemanalízishez egy PerkinElmer Avio 550 Max ICP-OES készüléket használtunk. Az előkészített talajminták által tartalmazott „összes” toxikus elem vizsgálatához királyvizes feltárást végeztünk. A mérést az MSZ 21470-50:2006-os szabvány alapján végeztük.

Gamma-spektroszkópia

A gamma-spektroszkópiát egyre többször alkalmazzák a talajtudományban mint passzív távérzékelési geofizikai módszert, amellyel a talajban és a kőzetekben természetesen jelen lévő izotópok bomlásából származó gamma-sugárzás detektálható. Méréseinkhez egy ORTEC Model GMX25P4-76-C típusú műszert használtunk HPGe félvezető detektorral, amely talaj- és talajvízmintákban lévő gamma-sugárzó izotópok azonosítására, azok abszolút és fajlagos aktivitásának meghatározására alkalmas (Minty 1997; Matula-Tóth 2019). A méréseket a laktanyából származó, hat fúrópontból gyűjtött talajmintákon (96 db) végeztük el. Az előkészített mintákat Marinelli-edényekbe töltöttük, egyedi azonosítóval láttuk el, lezártuk, majd lemértük. A méréseket Gamma Vision – 32 szoftverrel hitelesített etalonok segítségével végeztük.

Ökotoxikológia

Kutatásunk során a természetes ökoszisztémát modellező rendszert (mikrokozmoszt) állítottunk fel a mintaterület teljes talajvizsgálatára, a közvetlen, hatáson alapuló

döntési rendszerek támogatása céljából. Feltételezzük, hogy komplex szennyezés esetén a tesztek alkalmazásával pontosabb becslést kapunk az ökoszisztéma állapotról.

A szennyezések ökoszisztémára gyakorolt hatásának felmérésére akut és krónikus állati és növényi teszteket végeztünk. Állati tesztszervezetnek az ugróvillásokhoz (*Collembola*) tartozó *Folsomia candida* fajt választottuk, míg növényi tesztszervezetnek az angol perjét (*Lolium perenne*). Mindkét tesztszervezet megfelel az ökotoxikológiai tesztek kritériumainak, könnyen fenntartható, költséghatékony, és a szakirodalmi leírások alapján érzékeny a kísérletben alkalmazott szennyező anyagokra. A növényi tesztek a mikrokozmosz-kísérlet részeként kerültek kivitelezésre, és az egyes kezelések biomasszatömegre gyakorolt hatását vizsgáltuk. A collembolákkal akut mortalitási és krónikus szaporodásgátlási teszteket is végeztünk a talajoszlop- és a mikrokozmosz-kísérlet lezárásaként. A tesztek megkezdése előtt mindkét tesztszervezettel próbatesztet végeztünk. A próbatesztek során a perje esetében a csírázásgátlást, míg a collemboláknál a dózis-hatás összefüggést vizsgáltuk.

Összefoglalás

Egy katasztrófa során a talajba került szennyezés komoly hatással van mind a környezetre, mind az emberre. A káresemény által érintett területen szükség lenne a talajállapot *in situ* felmérésére alkalmas eszközök, illetve módszerek alkalmazására és a katasztrófavédelmi eljárásrendbe integrálásukra.

Számos kutatás igazolta a roncsolásmentes felvételezés és az ökotoxikológiai vizsgálatok létjogosultságát a talajszennyezések vizsgálatában. A katasztrófavédelmi gyakorlatban alkalmazott kockázatbecslési módszerek a „klasszikus” kémiai analitikai vizsgálatokra épülnek, amelyeknek jelentős az idő- és költségigényük, emellett egy lehetséges sugárszennyezés esetén magas egyéni kockázattal is járhat a terepi mérések kivitelezése. A gyors döntéshozatal különösen katasztrófahelyzetekben kiemelt fontosságú, ezért a kárhely *in situ* vizsgálatára alkalmas, gyors eljárásra lenne szükség, a talajegészségre vonatkozó adatok interpretációjával kiegészítve, mindemellett biztosítva az egyéni kockázat minimalizálását. A proximal soil sensing és az ökotoxikológia kombinálása a talajbiztonság területén új, optimalizált megközelítést jelenthet.

Kutatásunk célja komplex talajszennyezések vizsgálata volt a talajtudományban alkalmazott felszínközeli, roncsolásmentes eszközök és ökotoxikológiai módszerek kombinált alkalmazásával. A roncsolásmentes elemztartalom-vizsgálatokat hordozható, kézi röntgen-fluoreszcens spektrométerrel végeztük a kiválasztott mintaterületen. Az eredményeket ICP-OES mérésekkel ellenőriztük. A sugárzás detektálását drónra rögzített sugárásmérő eszközzel a levegőben, illetve felszínközeli is elvégeztük. Az adatokat gamma-spektrométeres

mérésekkel vetettük össze. A mérésekkel a proximal soil sensing módszerek katasztrófavédelmi alkalmazhatóságának vizsgálata volt a célunk. A kutatás során beállított két kísérlettel a szennyezések vertikális mozgását és a komplex talajszennyezés ökoszisztémára gyakorolt hatását vizsgáltuk. A szennyezések ökotoxikológiai hatását akut és krónikus állati és növényi tesztekkel tanulmányoztuk. Kutatásunk vizsgálati része már lezárult, az eredmények értékelése jelenleg is zajlik. Eredményeinket egy következő cikkben tervezzük publikálni.

Kutatásunkkal szeretnénk hozzájárulni a kárhely minősítésére vonatkozó módszertan fejlesztéséhez, ezzel támogatva a katasztrófavédelmi szervezeti struktúra egyes szintjein elhelyezkedő irányító és végrehajtó egységek operatív munkavégzését. Vizsgálati eredményeinkkel igazolni szeretnénk, hogy a veszélyes területek sugárzásának detektálása közben a magas egyéni kockázat minimalizálható. Továbbá javaslatot kívánunk tenni a katasztrófavédelem komplex szennyezések esetén alkalmazott, ökológiai kockázatbecslés talajtani vizsgálati módszertanának továbbfejlesztésére. Az eredmények egy kárhely állapotának értékelésekor segíthetik a közvetlen, hatáson alapuló döntést.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük dr. Árvai Mátyásnak és dr. Mészáros Jánosnak a légi dozimetriai mérések kivitelezésében nyújtott segítségüket.

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium Kooperatív Doktori Program Nemzetvédelmi Alprogram Doktori Hallgatói Ösztöndíj programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



Irodalomjegyzék

- 2205/1996. (VII. 24.) Korm. határozat az állami felelősségi körbe tartozó, hátrahagyott környezetkárosodások kármentesítéséről.
- Alves, P. R. L., & Cardoso, E. J. B. N. (2016) Overview of the standard methods for soil ecotoxicology testing Invertebrates. In: Laramendy, M. L., & Soloneski, S. (eds) Experimental Models in Toxicity Screening. InTech. <https://doi.org/10.5772/62228>
- Ambrusz J. & Muhoray Á. (2015) A vörösiszap-katasztrófa következményeinek felszámolása, a keletkezett károk helyreállítása. Bolyai Szemle, Vol 4. <http://hdl.handle.net/20.500.12944/14488>

- Beck, H. L., & Bennett, B. G. (2002) Historical overview of atmospheric nuclear weapons testing and estimates of fallout in the continental United States. *Health Physics*, Vol. 82. No. 5. pp. 591–608.
- Brevik, E. C., Pereg, L., Steffan, J. J., & Burgess, L. C. (2018) Soil ecosystem services and human health. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, Vol. 5. pp. 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.07.003>
- Cracknell, A. P. (2007) *Introduction to Remote Sensing*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press.
- Czibolya A. (2015) A tisztai ciánszennyezés néhány környezeti hatása. *Jelenkori társadalmi és gazdasági folyamatok*, Vol. 10. No. 1. pp. 59–64. <https://doi.org/10.14232/jtgef.2015.1.59-64>
- Endrédy I. (2013) A szovjet csapatok kivonása Magyarországról és a környezeti károk felszámolásának története. Budapest, Palásthy Bt. Energiaügyi Minisztérium (é. n.) Magyar Állami Környezetvédelem Hivatalos Honlapja. A környezeti kármentesítésről. <https://xn--krnyezetvedelem-jkb3r.hu/kornyezeti-karmentesitesrol> [Letöltve: 2023. 12. 01.]
- ENSZ (2017) The 3rd Sustainable Development Goal: Ensure healthy lives and promote well-being for all at all ages. In: *The Sustainable Development Goals Report*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022.pdf>
- FAO and ITPS (2015) Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf> [Letöltve: 2023. 11. 15.]
- FAO and UNEP (2021) Global assessment of soil pollution – Summary for policy makers. FAO, Rome. <https://doi.org/10.4060/cb4827en>
- Fathi, R. (2023) Conceptualising the ‘Administration of the Dead’: Cadavers, war and public health in the early 20th century. *History Compass*, Vol. 21. No. 2, e12758. <https://doi.org/10.1111/hic3.12758>
- Fernandez-Lopez, C., Posada-Baquero, R., & Ortega-Calvo, J.-J. (2022) Nature-based approaches to reducing the environmental risk of organic contaminants resulting from military activities. *Science of the Total Environment*, Vol. 843, 157007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157007>
- Gong, P., Tang, X.-B., Huang, X., Wang, P., Wen, L.-S., Zhu, X.-X., & Zhou, C. (2019) Locating lost radioactive sources using a UAV radiation monitoring system. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 150. pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.04.037>
- Gruiz K., Horváth B. & Molnár M. (2001) *Környezettoxikológia. Vegyi anyagok hatása az ökoszisztémára*. Budapest, Műegyetem Kiadó.
- Gruiz, K., Meggyes, T., & Fenyvesi, E. (2015) *Engineering Tools for Environmental Risk Management*. 2. Environmental Toxicology. London, CRC Press.
- Hábermayer T., Türriné Barta Á., Sárossy G. & Kieffer G. (2019) A katasztrófavédelmi műveletek támogatása önkéntesek bevonásával. *Hadmérnök*, Vol. 14. No. 3. pp. 35–51. <https://doi.org/10.32567/hm.2019.3.4>
- Hall, G. E. M., Bonham-Carter, G. F., & Buchar, A. (2014) Evaluation of portable X-ray fluorescence (pXRF) in exploration and mining: Phase 1, control reference materials. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, Vol. 14. pp. 99–123. <https://doi.org/10.1144/geochem2013-241>
- Horta, A., Malone, B., Stockmann, U., Minasny, B., Bishop, T. F. A., McBratney, A. B., Pallasser, R., & Pozza, L. (2015) Potential of integrated field spectroscopy and spatial analysis for enhanced assessment of soil contamination: A prospective review. *Geoderma*, Vol. 241–242. pp. 180–209. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.11.024>
- Hou, X., He, Y., & Jones, B. T. (2004) Recent advances in portable X-ray fluorescence spectrometry. *Applied Spectroscopy Reviews*, Vol. 39. pp. 1–25. <https://doi.org/10.1081/ASR-120028867>
- Hund-Rinke, K., & Wiechering, H. (2001) Earthworm avoidance test for soil assessments: An alternative for acute and reproduction tests. *Journal of Soils and Sediments*, Vol. 1. pp. 15–20. <https://doi.org/10.1007/BF02986464>
- International Atomic Energy Agency (IAEA) (2020) Incident and Trafficking Database (ITDB). Incidents of Nuclear and Other Radioactive Material out of Regulatory Control. <https://www.iaea.org/sites/default/files/20/02/itdb-factsheet-2020.pdf> [Letöltve: 2023. 11. 15.]
- Kádár I. szerk. (1998) *Kármentesítési kézikönyv 2. A szennyezett talajok vizsgálatáról*. Budapest, Környezetvédelmi Minisztérium.
- Kalnicky, D. J., & Singhvi, R. (2001) Field portable XRF analysis of environmental samples. *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 83. No. 1–2. pp. 93–122. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00330-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00330-7)
- Khorram, S., Koch, F. H., van der Wiele, C. F., & Nelson, S. A. C. (2012) *Remote Sensing*. New York, Springer.
- Kovács-Széles É., Almási I., Balaskó Á., Bíró C., Bodor K., Csöme C., Kakuja I., Kreitz Z., Papp K., Tóbi C. & Volarics J. (2020) Hogyan kezeljük egy radioaktív anyaggal szennyezett bűnügyi helyszínt? *Belügyi Szemle*, Vol. 68. No. 12. pp. 43–62. <https://doi.org/10.38146/BSZ.2020.12.2>
- Matula R. & Tóth T. (2019) Talajok agyagtartalmának becslése gamma-spektroszkópiai mérésekkel. *Agrokémia és Talajtan*, Vol. 68. No. 2. pp. 367–383. <https://doi.org/10.1556/0088.2019.00034>
- MSZ 21470-50:2006 Környezetvédelmi talajvizsgálatok. Az összes és az oldható toxikus elem-, a nehézfém- és a króm(VI)tartalom meghatározása.
- Minty, B. (1997) Fundamentals of airborne gamma-ray spectrometry. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, Vol. 17. No. 2. pp. 39–50.
- Narbuyayevna, A. R., Shomuratovna, B. R., Sattarovna, N. Z., & Ikramovna, N. Z. (2022) Explore Ecological and Hygiene Assignment of Soil Contamination with Heavy Metals. *Central Asian Journal of Medical and Natural Science*, Vol. 3. No. 3. pp. 107–111. <https://cajmns.centralasianstudies.org/index.php/CAJMNS/article/view/738>
- Olesik, W. J. (1991) Elemental analysis using ICP-OES and ICP/MS. *Analytical Chemistry*, Vol. 63. No. 1. pp. 12A–21A. <https://doi.org/10.1021/ac00001a001>
- Pásztor, L., & Takács, K. (2014) Remote sensing in soil mapping – A review. *Agrokémia és Talajtan*, Vol. 63. No. 2. pp. 353–370. <https://doi.org/10.1556/agrokem.63.2014.2.13>
- Peinado, F. M., Ruano, S. M., González, M. G. B., & Molina, C. E. (2010) A rapid field procedure for screening trace elements in polluted soil using portable X-ray fluorescence (PXRF). *Geoderma*, Vol. 159. No. 1–2. pp. 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.06.019>
- Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M., & Brevik, E. C. (2018) Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, Vol. 5. pp. 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>
- Pöllänen, R., Toivonen, H., Peräjärvi, K., Karhunen, T., Ilander, T., Lehtinen, J., Rintala, K., Katajainen, T., Niemelä, J., & Juusela, M. (2009) Radiation surveillance using an unmanned aerial vehicle. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 67. No. 2. pp. 340–344. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.10.008>
- Ramzaev, V., Mishine, A., Golikov, V., Brown, J. E., & Strand, P. (2007) Surface ground contamination and soil vertical distribution of ¹³⁷Cs around two underground nuclear explosion sites in the Asian Arctic, Russia. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 92. No. 3. pp. 123–143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.10.001>
- Rasha, S. A. (2020) A review on soil radionuclide distribution in Iraq analysed using gamma ray spectroscopy. *Environmental Forensics*, Vol. 22. No. 1–2. pp. 91–98. <https://doi.org/10.1080/15275922.2020.1805827>

- Rhodes, M. W., Bennie, J. J., Spalding, A., French-Constant, R. H., & Maclean, I. M. D. (2022) Recent advances in the remote sensing of insects. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 97. No. 1. pp. 343–360. <https://doi.org/10.1111/brv.12802>
- Rouillon, M., & Taylor, M. P. (2016) Can field portable X-ray fluorescence (pXRF) produce high quality data for application in environmental contamination research? *Environmental Pollution*, Vol. 214. pp. 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.055>
- Stockmann, U., Cattle, S. R., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2016) Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis. *Catena*, Vol. 139. pp. 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.007>
- Straalen, N. M. van (2002) Assessment of soil contamination – A functional perspective. *Biodegradation*, Vol. 13. pp. 41–52. <https://doi.org/10.1023/A:1016398018140>
- Thestorf, K., & Makki, M. (2022) Soils and landforms of war – Pedological investigations 75 years after World War II. *Geomorphology*, Vol. 407, 108189. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108189>
- Viscarra Rossel, R. A., Adamchuk, V. I., Sudduth, K. A., McKenzie, N. J., & Lobsey, C. (2011) Chapter five – Proximal soil sensing: An effective approach for soil measurements in space and time. *Advances in Agronomy*, Vol. 113. pp. 243–291. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386473-4.00005-1>
- Walsh, J., Kelleher, K., & Currian, L. (2019) Assessment of Safecast bGeigie Nano Monitor. *Radiation Environment and Medicine*, Vol. 8. No. 1. pp. 1–8. https://doi.org/10.51083/radiatenviromed.8.1_1
- Weindorf, D. C., Zhu, Y., Chakraborty, S., Bakr, N., & Huang, B. (2012) Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for environmental quality assessment of peri-urban agriculture. *Environmental Monitoring Assessment*, Vol. 184. pp. 217–227. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1961-6>
- Zhidkin, A. P., Shamshurina, E. N., Golosov, V. N., Komissarov, M. A., Ivanova, N. N., & Ivanov, M. M. (2020) Detailed study of post-Chernobyl Cs-137 redistribution in the soils of a small agricultural catchment (Tula region, Russia). *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 223–224, 106386. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106386>