

Олександр МЕНЬШОВ¹, д-р геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
e-mail: menshov@knu.ua

Ксенія БОНДАР^{1,2}, д-р геол. наук
ORCID ID: 0000-0002-4946-7707
e-mail: kbondar@igf.edu.pl

Володимир БАХМУТОВ³, д-р геол. наук, проф., чл.-кор. НАН України
ORCID ID: 0000-0003-3804-9953
e-mail: bakhmutovvg@gmail.com

Дмитро ГЛАВАЦЬКИЙ³, канд. геол. наук, ст. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com

Євген ПОЛЯЧЕНКО³, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
e-mail: poliachenkoib@gmail.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Інститут геофізики Польської академії наук, Варшава, Польща

³Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ, Україна

МАГНІТНО-МІНЕРАЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ КИЇВЩИНИ, УРАЖЕНИХ ВІЙСЬКОВИМИ ДІЯМИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С. А. Вишвою)

Вступ. Одним із небезпечних впливів на довкілля, викликаних військовими діями в Україні, є деградація ґрунтового покриву, а саме його забруднення, перерозподіл генетичних горизонтів, ущільнення, зміна фізико-хімічних агрономічних показників тощо. Накопичений досвід показує, що більшість із цих процесів відображаються на магнітних властивостях ґрунтів.

Методи. Застосовано методіку магнітних досліджень, що передбачає повний спектр польових і лабораторних досліджень.

Результати. На основі розробленої діаграми для співвідношень ідеальної (безгістерезисної) магнітної сприйнятливості до низькочастотної магнітної сприйнятливості (χ_{ARM}/χ_{lf}) та ідеальної магнітної сприйнятливості до частотної залежності магнітної сприйнятливості (χ_{ARM}/χ_{fd}) було розбавлено дрібнозернисті магнітні частинки літогенного та бактеріального походження у ґрунтах дослідних ділянок Київщини. Для Старих Петрівців було ідентифіковано лише одну групу зразків. У Демидові виявили дві групи: більшу, позначену зеленим кольором, і меншу, позначену червоним. Нарешті, на ділянці дослідження Озера було визначено дві еквівалентні групи. За результатами термомагнітного аналізу магнітної сприйнятливості було ідентифіковано незвичний для ґрунтів "хвіст" після 600 °C, що вказує на вміст металевого заліза. Вміст важких металів у магнітній фракції ґрунтів з об'єктів військового ураження залежить від складу сплавів зброї, що вражає конкретне місце.

Висновки. Під час вибуху різних типів боєприпасів утворюються уламки неправильної форми через значний механічний вплив, а додаткове нагрівання в процесі призводить до утворення залізних сферул. Цей складний фізико-хімічний процес виникає внаслідок взаємодії високотемпературних газів, пилу та розплавленого металу. Зазначені об'єкти успішно ідентифікуються на основі експресних і дешевих магнітних методів.

Ключові слова: магнітна сприйнятливість, ґрунт, важкі метали, намагніченість, військові дії.

Вступ

Повномасштабне вторгнення в Україну завдає незворотного катастрофічного впливу на довкілля, зокрема забруднюючи та пошкоджуючи ґрунтовий покрив. Військові дії спричиняють не лише фізичне погіршення стану ґрунтів, а і їхнє хімічне забруднення. Пряме влучання снарядів, згоріла військова техніка та нафтопродукти руйнують екосистему, забруднюючи ґрунти і воду важкими металами та токсичними елементами. Основними джерелами хімічного забруднення ґрунтів є витікання палива та мастильних матеріалів з військової техніки, використання бойових хімічних речовин, (напалм, білий фосфор), вибухівка, що містить тротил і гексоген, а також токсичні речовини, які виділяються під час згорання боєприпасів і військової техніки. Ґрунти також забруднюються важкими металами, що потрапляють із залишками боєприпасів та військової техніки, серед яких алюміній (Al), кобальт (Co), миш'як (As), нікель (Ni), кадмій (Cd), мідь (Cu), хром (Cr), ртуть (Hg), цинк (Zn) та ін.

Накопичений досвід свідчить, що процеси деградації ґрунтового покриву, а саме його забруднення, перерозподіл

генетичних горизонтів, ущільнення, зміна фізико-хімічних агрономічних показників тощо, відображаються у магнітних властивостях ґрунтів (Salazar-Rojas, Cejudo-Ruiz, & Calvo-Brenes, 2024; Hu et al., 2022). Магнетизм ґрунтів залежить від вмісту магнітних мінералів (магнетиків) різного походження. У контексті впливу військових дій припускається наявність магнетиків ґрунтового (педогенного), антропогенного та техногенного (зокрема й військового впливу) походження. Отже, у пропонованій статті ми розглянемо саме магнітно-мінералогічний склад ґрунтів, що зазнали впливу військових дій, з метою пошуків зв'язків із деструктивними явищами у ґрунтах.

У зазначеному контексті на прикладах недавніх робіт розкриємо сучасний стан проблеми комплексування магнітних (напр., χ_{lf}) й інших (напр., ICP, pXRF) методів для вивчення забруднення ґрунтового покриву. Магнітні дослідження є цінним методом визначення просторового розподілу геохімічного забруднення ґрунту та повітря і забезпечують ідентифікацію антропогенної емісії небезпечних ультрадисперсних частинок (Bucko et al., 2011). Комбінація визначення елементного складу

методом ICP і магнітної сприйнятливості (χ f) характеризує структуру просторового забруднення і збагачення потенційно токсичними важкими металами (Cu, Zn, Pb, As, Sb, Cd і Hg). У південно-східній дельті Нілу (Guda et al., 2020) досліджували ґрунти поблизу промислових зон із рівнями забруднення, що значно варіюють, високою концентрацією у верхній частині ґрунту важких металів і явною тенденцією спадання у глибших шарах. Мультидоменні магнітні частинки вказують на внесення антропогенного матеріалу на звалища автомобільного брухту (Barbosa et al., 2020). Іншими словами, є всі підстави для залучення магнітних й інших методів з метою визначення рівня забруднення внаслідок військових дій.

Для ідентифікування мінералів заліза магнітні методи зазвичай супроводжуються результатами скануючої електронної мікроскопії (SEM) й енергодисперсійної спектроскопії (EDS) (Maity et al., 2021). Параметри магнітного гістерезису вказують на наявність у зразках крупнозернистих псевдооднодоменних (PSD) і багатодоменних (MD) зерен магнетиту, що виникли внаслідок антропогенного забруднення (Menshov et al., 2023). Є багато робіт, у яких магнітну сприйнятливість використовують як наближену оцінку забруднення ґрунту важкими металами. Наприклад, високі та значні кореляції (0,41–0,89) між магнітною сприйнятливістю та концентраціями Fe, Zn та PLI були зареєстровані в Саксонії (Rachwał et al., 2017). Магнітні методи є ефективними для визначення рівня забруднення важкими металами й ідентифікування залізовмісних мінералів у вуличному пилю, що містить металеве залізо й карбід заліза (Górka-Kostrubiec et al., 2023). У роботі (Jordanova et al., 2021) за результатами кореляції між магнітною сприйнятливістю й індексом загального забруднення (PLI) визначено граничні показники магнітної сприйнятливості, що відповідають різним категоріям PLI. Цей підхід визнано успішним для моніторингу й картографування з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Для оцінювання рівня забруднення більшої частини міста Денізілі (Туреччина) було проведено багатовимірний статистичний аналіз (кластерний аналіз) й аналіз головних компонентів (PCA) та встановлено зв'язок між забрудненням важкими металами, величинами магнітної сприйнятливості та результатами флуоресцентного XRF-аналізу (Oudeika et al., 2020).

Важливим завданням є визначення джерела аномальних магнітних і геохімічних параметрів у ґрунтах як наслідок літогенного, педогенного чи техногенного забруднення. Результати (Szuszkiewicz et al., 2016) вказують, що співвідношення χ/Fe може бути надійним індикатором для визначення змін походження магнітного сигналу в профілях ґрунту. Чітке розуміння ризику для здоров'я ультрадисперсних частинок вимагає ідентифікування антропогенних зовнішніх джерел за геохімічним складом матеріалу пилю (Kelepertzis et al., 2019). Дані зі столичної зони Афін вказують на те, що антропогенні магнітні частинки, які утворюються внаслідок згоряння та вихлопних газів транспортних засобів, є надзвичайно поширеними.

Попередні результати поєднання магнітних і геохімічних методів, як універсальний інструмент для вивчення забруднення і зв'язку з військовими діями, нами були представлені в дослідженнях (Bondar et al., 2023; Menshov et al., 2024). Метою пропонованої роботи є порівняння результатів магнітних вимірювань і даних XRF для пілотної колекції зразків, зібраних на колишньому полі бою, місці ураження ракети та місці знищення нерозірваних боєприпасів на північ від Києва для виявлення забруднення, пов'язаного з війною.

Об'єкти дослідження. Досліджувана територія розташована на відстані 35–40 км північніше Києва, у межах Бучанського та Вишгородського р-нів Київської обл., на правому березі р. Дніпро (рис. 1). Найближчими населеними пунктами є села Демидів, Озера та Старі Петрівці. Значна частина цієї території вкрита лісами. Північно-західна частина Київської обл. має переважно рівнинний рельєф, розділений долинами річок, ярами та балками. Тут поширені лісові масиви, переважно хвойні та мішані. Регіон багатий на водні ресурси. Це, зокрема, річки (Дніпро, Ірпінь, Тетерів), озера та ставки. Полігон Демидів являє собою вирву від вибуху ракети в сосновому лісі, полігон Озера – пасовище поза дачними ділянками, полігон Старі Петрівці – місце знищення боєприпасів.

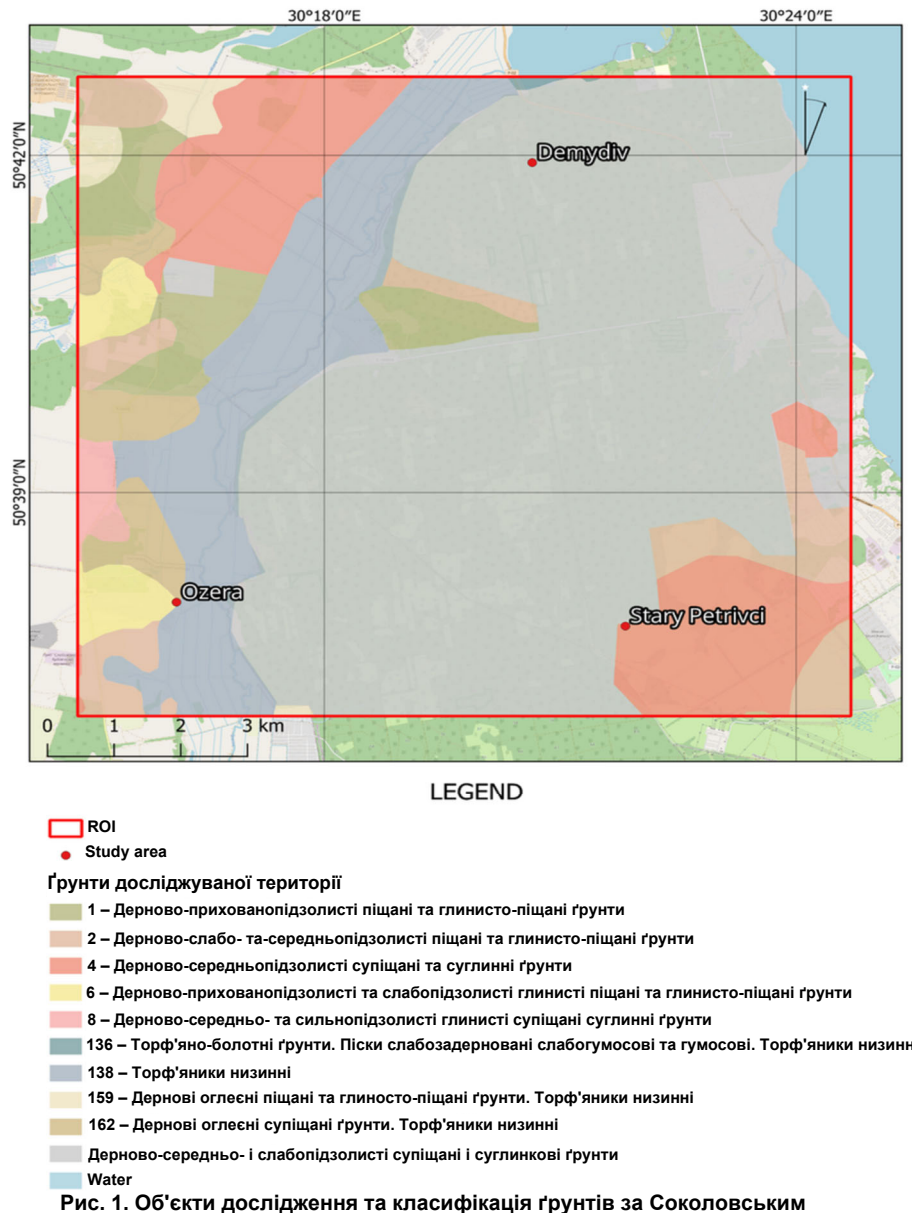
Ландшафтні умови є характерними для Поліської зони України. ґрунти переважно Umbric Albeluvisols Abruptic за класифікацією WRB (WRB, I. W. G., 2014). Клімат помірно-континентальний з теплим і вологим літом і м'якою зимою. Середньорічна температура +6,5...+7,5 °С. Річна кількість опадів становить 550...650 мм. Відповідно до кліматичної класифікації Кеппена, клімат досліджуваної території належить до зони Dfb (Lohmann et al., 1993), що означає помірно холодний (континентальний) клімат з температурою липня 18–23 °С, а січня: -10–0 °С.

За більш поширеною в Україні класифікацією ґрунтів Соколовського (див. рис. 1), північно-західна частина Київської обл. має різноманітний ґрунтовий покрив, зумовлений її географічним розташуванням, рельєфом і кліматичними умовами. Дерново-підзолисті ґрунти, що переважають на півночі та заході, відзначаються низькою родючістю та схильністю до ерозії. Опідзолені чорноземи, що зустрічаються в центральних і південних районах, більш родючі та менш схильні до ерозії. Лучно-чорноземні ґрунти, які характерні для долин річок, є дуже родючими. Піщані ґрунти характеризуються низькою родючістю та потребують унесення добрив. Торфово-болотні ґрунти зустрічаються в низинах і потребують осушення та вапнування. Тип ґрунту впливає на вибір сільськогосподарських культур, які можна вирощувати на цій території.

Під час захоплення Київської обл. частина досліджуваної території входила до окупованих територій (рис. 2).

Методи

Відбір проб ґрунту супроводжувався вимірюваннями польової об'ємної магнітної сприйнятливості за допомогою портативного капаметру РКМ-7. Питому магнітну сприйнятливість χ визначали в лабораторних умовах за допомогою MFK1-FB Carrbridge. Термоманітний аналіз магнітної сприйнятливості виконували за допомогою VLY5 Carrbridge з приставками CS4 і CS-L відповідно для високих (20–700 °С) і низьких (-195–0 °С) температур. Ізотермічна залишкова намагніченість насичення (M_{rs}) була отримана в полі 1 Тл за допомогою імпульсного магнітизатора MMPM10 (Magnetic Measurements, Велика Британія). Для вимірювання безгістерезисної залишкової намагніченості (ARM) використовували LDA5/PAM1 AF Demagnetizer (AGICO, Чехія) з максимальним змінним полем 100 мТл та SQUID (2G Enterprises, США). Далі було розраховано безгістерезисну магнітну сприйнятливість χ_{ARM} . Співвідношення χ_{ARM}/χ , M_{rs}/χ і ARM/M_{rs} використовуємо як чутливі до розміру зерна параметри. Високі значення вказують на відносно збагачення однодоменними (SD) частинками, тоді як низькі значення відповідають переважальним MD- та/або SP-частинкам. Детальніше методики магнітомінералогічних вимірювань наведено в роботах (Evans, & Heller, 2003; Maxbauer, Feinberg, & Fox, 2016).



Результати

Діаграма, наведена на рис. 3, запропонована для співвідношень χ_{ARM}/χ_{lf} та χ_{ARM}/χ_{fd} з метою ідентифікації дрібнозернистих магнітних частинок літогенного та біогенного походження (Oldfield, 1994). Для Старих Петрівців ідентифіковано лише одну групу зразків (зелений колір). Для Демидова ми виділили дві групи: більшу, позначену зеленим кольором, і меншу, позначену червоним кольором. Нарешті, дві еквівалентні групи були визначені на ділянці дослідження Озера.

Раніше закордонні вчені (Oldfield, 1994; Evans, & Heller, 2003) запропонували методику розбракуння дрібнозернистих уламкових і бактеріальних мінералів у ґрунті (Menshov, 2018). Дослідники використали один набір зразків й успішно визначили дві групи, що представляють детритні та бактеріальні частинки. Щодо Старих Петрівців ми змогли виявити лише одну вибірккову групу (рис. 3). Це вказує на домінування одного магнітного фактора мінералоутворення (рис. 3 а). Ураховуючи особливості полігону Старі Петрівці ми висунули гіпотезу, що техногенні магнітні мінерали повинні бути результатом забруднення внаслідок знешкодження боеприпасів шляхом їхнього підриву.

Водночас виділення двох груп мінералів (позначені зеленим і червоним кольорами на рис. 3 б і 3 с) є свідченням того, що магнітні мінерали містять біогенний магнетит, отриманий із магнітотактичних бактерій (мікроаеробне середовище згідно з (Linford et al., 2005)), а також уламковий магнетит техногенного походження. Інтерпретування всіх зразків разом (рис. 3 d) є малоінформативним.

Для ідентифікування магнітних мінералів у ґрунтах були залучені дані терромагнітного аналізу (рис. 4). З метою підвищення інформативності дослідів нами було виділено магнітну фракцію з ґрунтів з усіх ділянок. У цьому досліді детальніше розглянемо результати для ділянки Старі Петрівці. Зміни магнітної сприйнятливості в діапазоні температур $-195-0^{\circ}\text{C}$ (низькотемпературний аналіз) були незначними, що характерно для дрібнозернистих оксидів заліза (Eugé, & Shaw, 1994). Відсутність переходу Вервея (T_v) свідчить про відсутність стехеометричного магнетиту, що може бути наслідком маггемітизації (Ozdemir, & Dunlop, 2010), коли температура Вервея повністю пригнічується, або відбувається катіонна заміна, тобто на кривих перехід не спостерігаємо (Jackson, & Moskowitz, 2021).

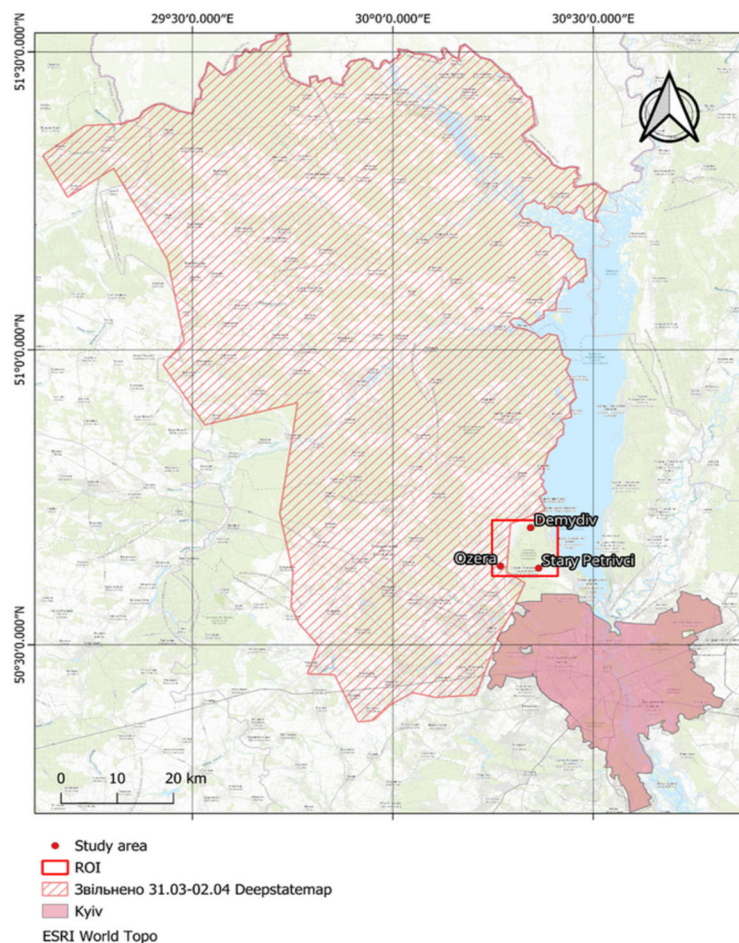


Рис. 2. Територія дослідження в контексті окупації за даними Deepstatemap

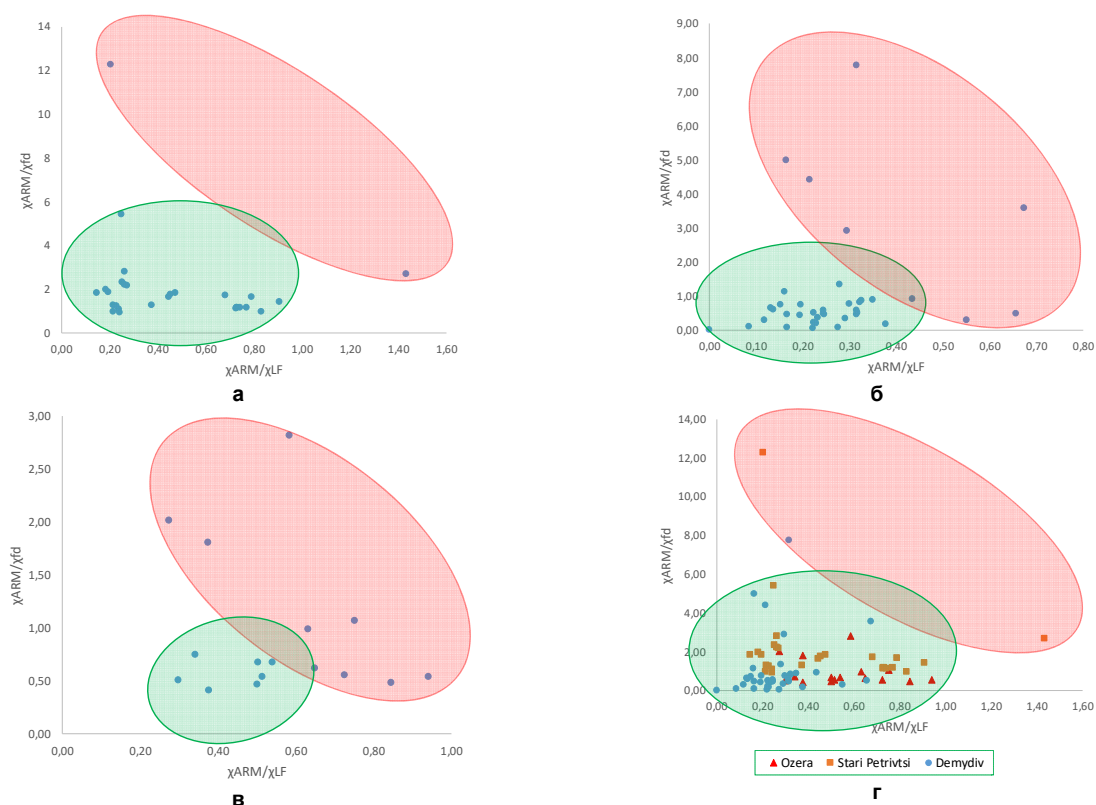


Рис. 3. Розрізнення магнітних частинок детритового та бактеріального походження за методикою (Oldfield, 1994): а) Старі Петрівці, б) Демидів, в) Озера, г) усі разом

Результати високотемпературного аналізу для зразків, відібраних на відстані 1 і 25 м від краю кратера, демонструють як характерну поведінку для ґрунтів, так і візуалізують інші ознаки, які ми вважаємо пов'язаними із забрудненням внаслідок вибухів. Характерними ознаками є те, що на кривих охолодження сигнал сильніший, ніж на кривих нагрівання, через утворення нової сильномагнітної фази. На кривих нагріву спостерігаємо невелике підвищення магнітної сприйнятливості нижче 280 °С, що можна інтерпретувати як поступове розблокування дрібнозернистих однодомених (SD) частинок, які є SD за кімнатної температури, але переходять у суперпарамагнітний стан за підвищених температур. Подальше підвищення магнітної сприйнятливості спостерігаємо в діапазоні 280–400 °С, що обумовлено утворенням незначної кількості нового феримагнітного матеріалу. Подальше підвищення між 400 і 500 °С з піком близько 520 °С можна пов'язати з ефектом Гопкінсона (повним або частковим) для SD магнетиту, що нижчий за точку Кюрі магнетиту ($T_c = 580$ °С)

(Dunlop, & Özdemir, 1997). Під час подальшого нагрівання магнітна сприйнятливість різко спадає до кінцевої температури 590–605 °С. Крива охолодження кожного зразка набагато вища, ніж його крива нагрівання, величини магнітної сприйнятливості значно збільшуються нижче 580 °С, що ми інтерпретуємо як утворення магнетиту у процесі нагрівання.

Водночас на кривих прослідковуємо незвичний для ґрунтів "хвіст" після 600 °С аж до 680 °С, що вказує на вміст металевого заліза. Віддаленіші від місця кратера зразки ґрунту не показують цей хвіст. Зразок із фракцією 1–100 мкм демонструє температуру Кюрі (T_c) 650 °С, характерну для маггеміту (Dunlop, & Özdemir, 1997). Крива охолодження також показує зазначену T_c , що свідчить про термічну стабільність відповідного мінералу. Найімовірніше ця магнітна фаза є термостабільним однодоменим і псевдооднодоменим маггемітом (SD-PSD) (Gehring et al., 2009). Отже, у зразках міститься як фракція заліза, так і маггеміт.

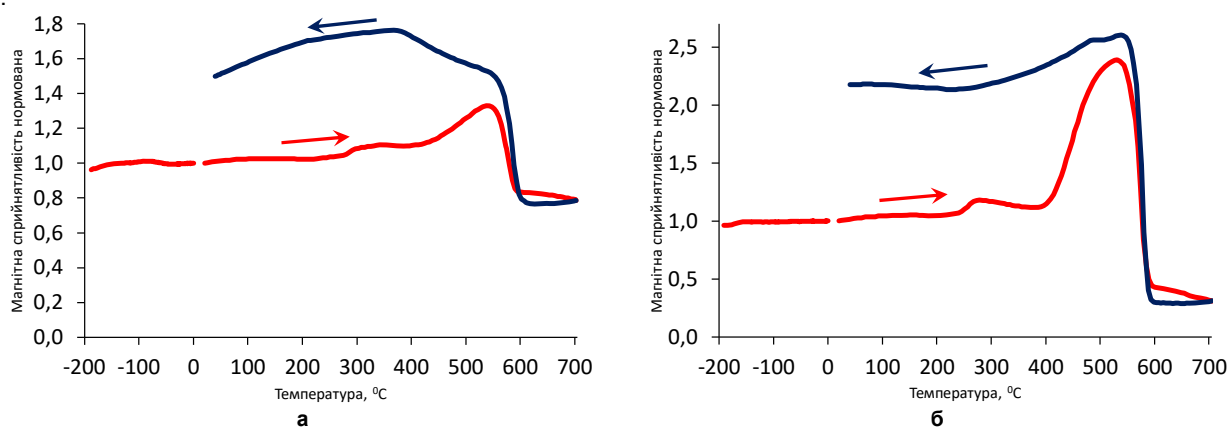


Рис. 4. Результати термомагнітного аналізу магнітної сприйнятливості для зразків полігону Старі Петрівці: а) 1 м від кратеру вибуху, б) 25 м від кратеру вибуху

Результати мікроскопічних досліджень зразків ґрунтів із місця вибуху для прикладу проілюструємо для полігону Старі Петрівці (рис. 5). Виявлено велику кількість сферул і фрагментів розміром від 1,5 до 100 мкм (рис. 5). Частина сфер має гладку поверхню. Частішими є порожнисті сферули з помітними дірками, що залишилися після дегазації (Magiera et al., 2011). Вони мають енцефалоїдну, табличну або скелетну поверхню.

Вміст важких металів у магнітній фракції ґрунтів з об'єктів військового ураження залежить від складу сплавів зброї. У складі магнітних сфер й уламків

переважають зразки, насичені залізовмісними гладкими кульками, що містять невелику кількість Ті, та кулистими фрагментами, які містять Zn, Cr та Al.

У нашому випадку утворення сферул й уламків також пов'язане з високотемпературними процесами, що відбуваються під час вибуху. Проте наявність агломератів сферул більшого розміру з вплавленими в них меншими сферулами вказує на те, що, крім термічного впливу, важливу роль у формуванні морфології частинок відігравало також значне динамічне навантаження.

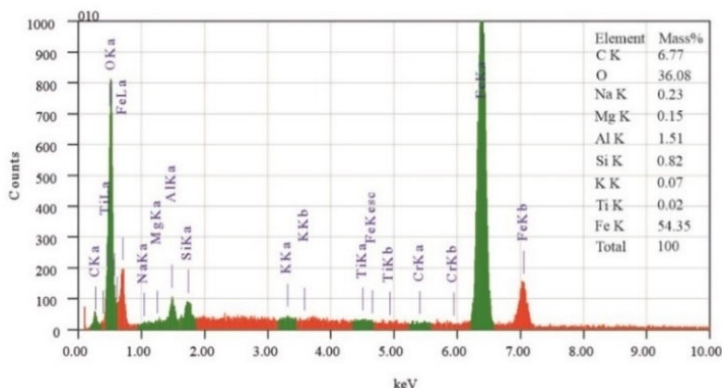
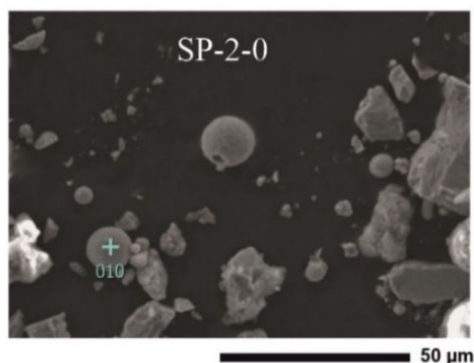


Рис. 5. Результати сканування електронним мікроскопом (SEM) і результати мікроаналізу частинок ґрунтів дослідної ділянки Старі Петрівці

Дискусія і висновки

Стабільні однодоменні (SSD) частинки були виявлені в ґрунтах для всіх досліджуваних ділянок, тоді як ґрунти у Старих Петрівцях містять як грубозернисті, так і дрібозернисті зерна. Високий вміст суперпарамагнітних (SP) частинок підтверджує постійні ґрунтотвірні процеси, зокрема й у верхньому шарі ґрунту (верхній гумусний горизонт А). Отже, у ґрунтах Старих Петрівців проявляються як техногенні, так і ґрунтові процеси. Магнітно-мінералогічні дані свідчать про те, що досліджувана ділянка Старі Петрівці демонструє магнітний сигнал, який можна інтерпретувати як техногенний.

У нашому випадку техногенний сигнал є еквівалентом спричинених війною аномалій магнітних параметрів та рівня забруднення ґрунту. З іншого боку, магнетизм ґрунтів дослідних ділянок Демидів й Озера зазвичай пов'язаний із ґрунтовими природними процесами, характерними для Полісся України. Іноді ідентифікуємо метали, які є великими (назвімо їх макрорівнем військового техногенного забруднення) частинками, що пов'язані з матеріалами вибуху. Водночас перерозподіл генетичних горизонтів ґрунту внаслідок бомбардувань і вибухів ракет є важливою інформацією і відображається у варіаціях магнітних величин.

Під час вибуху різних типів боєприпасів утворюються уламки неправильної форми через потужне механічне навантаження, а додаткова наявність високотемпературної компоненти процесу призводить до утворення металевих сферул. Це складний фізико-хімічний процес, що виникає внаслідок взаємодії високотемпературних газів, пилу та розплавленого металу. Під впливом високих температур металеві складові боєприпасів розплавляються, переходячи в рідку фазу. Подальша взаємодія рідкої фази з навколишніми матеріалами, різке зниження тиску та швидка конденсація газоподібних речовин сприяють швидкому охолодженню металевого розчину в середовищі з мінімальною кількістю кисню, що забезпечує формування сферичних або кульоподібних структур різної морфології та складу (Fialová et al., 2006; Kutcho, & Kim, 2006).

Внесок авторів: Олександр Меньшов – ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Ксенія Бондар – ідея, аналіз та інтерпретація даних, магнітні вимірювання; Володимир Бахмутов – концептуалізація, написання (перегляд і редагування); Дмитро Главацький – методологія, валідація даних, вимірювання; Євген Поляченко – формальний аналіз, методологія.

Подяка та джерела фінансування: Дослідження виконувалися за проектом PAN.BFB.S.BWZ.394.022.2023, який реалізується в межах програми підтримки українських дослідників колективів Польської академії наук, що виконується у співпраці з Національною академією наук США. Ми вдячні за надану можливість користуватися апаратурою Інституту геофізики Польської академії наук (KLY5, MMPM10), що була закуплена завдяки проекту EPOS-PL (№ POIR.04.02.00-14-A003/16) у співфінансуванні з Європейським Союзом із фондів ERDF.

Список використаних джерел

- Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 80(1), 40–45.
- Barbosa, J. Z., Poggere, G. C., Teixeira, W. W. R., Motta, A. C. V., Prior, S. A., & Curi, N. (2020). Assessing soil contamination in automobile scrap yards by portable X-ray fluorescence spectrometry and magnetic susceptibility. *Environmental monitoring and assessment*, 192(1), 46.
- Bondar, K., Bakhmutov, V., Mеньшов, О., Polichenko, I., & Hlavatskyi, D. (2023). Detecting War-Related Pollution of Soils Using Magnetic and Geochemical Methods. First Results from Recaptured Outskirts of Kyiv. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520209>
- Bučko, M. S., Magiera, T., Johanson, B., Petrovský, E., & Pesonen, L. J. (2011). Identification of magnetic particulates in road dust accumulated on roadside snow using magnetic, geochemical and micro-morphological analyses. *Environmental Pollution*, 159(5), 1266–1276.
- Dunlop, D. J., & Özdemir, Ö. (1997). *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*. Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>

- Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics*. Elsevier.
- Eyre, J. K., & Shaw, J. (1994). Magnetic enhancement of Chinese loess – the role of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$? *Geophysical Journal International*, 117(1), 265–271.
- Fialová, H., Maier, G., Petrovský, E., Kapička, A., Boyko, T., Scholger, R., & MAGPROX Team. (2006). Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. *Journal of Applied Geophysics*, 59(4), 273–283.
- Gehring, A. U., Fischer, H., Louvel, M., Kunze, K., & Weidler, P. G. (2009). High temperature stability of natural maghemite: a magnetic and spectroscopic study. *Geophysical Journal International*, 179(3), 1361–1371.
- Górka-Kostrubiec, B., Świetlik, R., Szumiata, T., Dytłow, S., & Trojanowska, M. (2023). Integration of chemical fractionation, Mössbauer spectrometry, and magnetic methods for identification of Fe phases bonding heavy metals in street dust. *Journal of Environmental Sciences*, 124, 875–891.
- Guda, A. M. et al. (2020). Suitability of magnetic proxies to reflect complex anthropogenic spatial and historical soil heavy metal pollution in the southeast Nile delta. *Catena*, 191, 104552. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104552>
- Hu, X. F., Li, M., He, Z. C., Cui, L., Liu, R., Wang, X. D., & Wang, Z. H. (2022). Magnetic responses to heavy metal pollution of the industrial soils in Shanghai: Implying the influences of anthropogenic magnetic dustfall on urban environment. *Journal of Applied Geophysics*, 197, 104544.
- Jackson, M. J., & Moskowitz, B. (2021). On the distribution of Verwey transition temperatures in natural magnetites. *Geophysical Journal International*, 224(2), 1314–1325.
- Jordanova, N., Jordanova, D., Tcherkezova, E., Georgieva, B., & Ishlyanski, D. (2021). Advanced mineral magnetic and geochemical investigations of road dusts for assessment of pollution in urban areas near the largest copper smelter in SE Europe. *Science of the Total Environment*, 792, 148402.
- Kelepertzis, E., Argyraki, A., Botsou, F., Aidona, E., Szabó, Á., & Szabó, C. (2019). Tracking the occurrence of anthropogenic magnetic particles and potentially toxic elements (PTEs) in house dust using magnetic and geochemical analyses. *Environmental pollution*, 245, 909–920.
- Kutcho, B. G., & Kim, A. G. (2006). Fly ash characterization by SEM-EDS. *Fuel*, 85(17–18), 2537–2544.
- Linford, N., Linford, P., & Platzman, E. (2005). Dating environmental change using magnetic bacteria in archaeological soils from the upper Thames Valley, UK. *Journal of Archaeological Science*, 32(7), 1037–1043.
- Magiera, T., Jabłońska, M., Strzyszczyński, Z., & Rachwał, M. (2011). Morphological and mineralogical forms of technogenic magnetic particles in industrial dusts. *Atmospheric Environment*, 45(25), 4281–4290.
- Maitly, R., Venkateshwarlu, M., Mondal, S., Kapawar, M. R., Gain, D., & Paul, P. (2021). Magnetic and microscopic characterization of anthropogenically produced magnetic particles: a proxy for environmental pollution. *International journal of environmental science and technology*, 18, 1793–1808.
- Maxbauer, D. P., Feinberg, J. M., & Fox, D. L. (2016). Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges. *Earth-Science Reviews*, 155, 28–48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.014>
- Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Polichenko, I., & Bondar, K. (2024). Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine. *85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme)*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202410637>
- Menshov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Tonkha, O., Ivanik, O., Pereira, P., ... & Eiben, H. (2023). Distribution of soil magnetic susceptibility as a pollution indicator in the urban and tourist city of Lviv, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 82(21), 486.
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perlwitz, J., & Roeckner, E. (1993). The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Climate Research*, 177–193. <https://doi.org/10.3354/cr003177>
- Oldfield, F. (1994). Toward the discrimination of fine grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 99, 9045–9050. <https://doi.org/10.1029/93JB03137>
- Oudeika, M. S., Altinoglu, F. F., Akbay, F., & Aydin, A. (2020). The use of magnetic susceptibility and chemical analysis data for characterizing heavy metal contamination of topsoil in Denizli city, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 183, 104208.
- Özdemir, Ö., & Dunlop, D. J. (2010). Hallmarks of maghemitization in low-temperature remanence cycling of partially oxidized magnetite nanoparticles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B2).
- Salazar-Rojas, T., Cejudo-Ruiz, F. R., & Calvo-Brenes, G. (2024). Magnetic and Chemical Testing in Plants, Road Dust and Soil, as Indicators of Atmospheric Pollution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(9), 601.
- Szuskiewicz, M., Łukasik, A., Magiera, T., & Mendakiewicz, M. (2016). Combination of geo-pedo- and technogenic magnetic and geochemical signals in soil profiles—diversification and its interpretation: a new approach. *Environmental pollution*, 214, 464–477.
- Rachwał, M., Kardel, K., Magiera, T., & Bens, O. (2017). Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition. *Geoderma*, 295, 10–21.
- WRB, I. W. G. (2014). World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Report*, 106.

References

- Barbosa, J. Z., Poggere, G. C., Teixeira, W. W. R., Motta, A. C. V., Prior, S. A., & Curi, N. (2020). Assessing soil contamination in automobile scrap yards by portable X-ray fluorescence spectrometry and magnetic susceptibility. *Environmental monitoring and assessment*, 192(1), 46.

- Bondar, K., Bakhmutov, V., Menshov, O., Poliachenko, I., & Hlavatskyi, D. (2023). Detecting War-Related Pollution of Soils Using Magnetic and Geochemical Methods. First Results from Recaptured Outskirts of Kyiv. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520209>
- Bučko, M. S., Magiera, T., Johanson, B., Petrovský, E., & Pesonen, L. J. (2011). Identification of magnetic particulates in road dust accumulated on roadside snow using magnetic, geochemical and micro-morphological analyses. *Environmental Pollution*, 159(5), 1266–1276.
- Dunlop, D. J., & Özdemir, Ö. (1997). *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*. Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>
- Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics*. Elsevier.
- Eyre, J. K., & Shaw, J. (1994). Magnetic enhancement of Chinese loess – the role of $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$? *Geophysical Journal International*, 117(1), 265–271.
- Fialová, H., Maier, G., Petrovský, E., Kapička, A., Boyko, T., Scholger, R., & MAGPROX Team. (2006). Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. *Journal of Applied Geophysics*, 59(4), 273–283.
- Gehring, A. U., Fischer, H., Louvel, M., Kunze, K., & Weidler, P. G. (2009). High temperature stability of natural maghemite: a magnetic and spectroscopic study. *Geophysical Journal International*, 179(3), 1361–1371.
- Górka-Kostrubiec, B., Świetlik, R., Szumiata, T., Dytłow, S., & Trojanowska, M. (2023). Integration of chemical fractionation, Mössbauer spectrometry, and magnetic methods for identification of Fe phases bonding heavy metals in street dust. *Journal of Environmental Sciences*, 124, 875–891.
- Guda, A. M. et al. (2020). Suitability of magnetic proxies to reflect complex anthropogenic spatial and historical soil heavy metal pollution in the southeast Nile delta. *Catena*, 191, 104552. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104552>
- Hu, X. F., Li, M., He, Z. C., Cui, L., Liu, R., Wang, X. D., & Wang, Z. H. (2022). Magnetic responses to heavy metal pollution of the industrial soils in Shanghai: Implying the influences of anthropogenic magnetic dustfall on urban environment. *Journal of Applied Geophysics*, 197, 104544.
- Jackson, M. J., & Moskowitz, B. (2021). On the distribution of Verwey transition temperatures in natural magnetites. *Geophysical Journal International*, 224(2), 1314–1325.
- Jordanova, N., Jordanova, D., Tcherkezova, E., Georgieva, B., & Ishlyamski, D. (2021). Advanced mineral magnetic and geochemical investigations of road dusts for assessment of pollution in urban areas near the largest copper smelter in SE Europe. *Science of the Total Environment*, 792, 148402.
- Kelepertzis, E., Argyraki, A., Botsou, F., Aidona, E., Szabó, Á., & Szabó, C. (2019). Tracking the occurrence of anthropogenic magnetic particles and potentially toxic elements (PTEs) in house dust using magnetic and geochemical analyses. *Environmental pollution*, 245, 909–920.
- Kutchko, B. G., & Kim, A. G. (2006). Fly ash characterization by SEM–EDS. *Fuel*, 85(17–18), 2537–2544.
- Linford, N., Linford, P., & Platzman, E. (2005). Dating environmental change using magnetic bacteria in archaeological soils from the upper Thames Valley, UK. *Journal of Archaeological Science*, 32(7), 1037–1043.
- Magiera, T., Jabłońska, M., Strzyszc, Z., & Rachwał, M. (2011). Morphological and mineralogical forms of technogenic magnetic particles in industrial dusts. *Atmospheric Environment*, 45(25), 4281–4290.
- Maity, R., Venkateshwarlu, M., Mondal, S., Kapawar, M. R., Gain, D., & Paul, P. (2021). Magnetic and microscopic characterization of anthropogenically produced magnetic particles: a proxy for environmental pollution. *International journal of environmental science and technology*, 18, 1793–1808.
- Maxbauer, D. P., Feinberg, J. M., & Fox, D. L. (2016). Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges. *Earth-Science Reviews*, 155, 28–48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.014>
- Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine. *85th EAGE Annual Conference & Exhibition* (including the Workshop Programme), 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202410637>
- Menshov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Tonkha, O., Ivanik, O., Pereira, P., ... & Eiben, H. (2023). Distribution of soil magnetic susceptibility as a pollution indicator in the urban and tourist city of Lviv, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 82(21), 486.
- Menshov, O. (2018). The role of magnetotactic bacteria in formation of natural magnetism of Ukraine soils. *Visnik of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80(1), 40–45 [in Ukrainian].
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perlwitz, J., & Roeckner, E. (1993). The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Climate Research*, 177–193. <https://doi.org/10.3354/cr003177>
- Oldfield, F. (1994). Toward the discrimination of fine grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 99, 9045–9050. <https://doi.org/10.1029/93JB03137>
- Oudeika, M. S., Altinoglu, F. F., Akbay, F., & Aydin, A. (2020). The use of magnetic susceptibility and chemical analysis data for characterizing heavy metal contamination of topsoil in Denizli city, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 183, 104208.
- Özdemir, Ö., & Dunlop, D. J. (2010). Hallmarks of maghemitization in low-temperature remanence cycling of partially oxidized magnetite nanoparticles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B2).
- Salazar-Rojas, T., Cejudo-Ruiz, F. R., & Calvo-Brenes, G. (2024). Magnetic and Chemical Testing in Plants, Road Dust and Soil, as Indicators of Atmospheric Pollution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(9), 601.
- Szuskiewicz, M., Łukasik, A., Magiera, T., & Mendakiewicz, M. (2016). Combination of geo-pedo-and technogenic magnetic and geochemical signals in soil profiles–diversification and its interpretation: a new approach. *Environmental pollution*, 214, 464–477.
- Rachwał, M., Kardel, K., Magiera, T., & Bens, O. (2017). Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition. *Geoderma*, 295, 10–21.
- WRB, I. W. G. (2014). World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Report*, 106.

Отримано редакцією журналу / Received: 18.05.24
Прорецензовано / Revised: 27.07.24
Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Oleksandr MENSHOV¹, DSc (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
e-mail: menshov@knu.ua

Kseniia BONDAR^{1,2}, DSc (Geol.)
ORCID ID: 0000-0002-4946-7707
e-mail: kbondar@igf.edu.pl

Volodymyr BAKHMUTOV³, DSc (Geol.), Prof., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3804-9953
e-mail: bakhmutovvg@gmail.com

Dmytro HLA VATSKYI³, PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlvatskyi@gmail.com

Ievgen POLIACHENKO³, PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
e-mail: poliachenkoib@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

³Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MAGNETIC MINERALOGICAL PROPERTIES OF KYIV REGION SOILS, AFFECTED BY WAR

Background. One of the dangerous effects on the environment caused by the military actions in Ukraine is the destruction of the soil. This includes its pollution, redistribution of genetic horizons, compaction, change of physical and chemical agronomic indicators, etc. Accumulated experience shows that most of these processes are reflected in the magnetic properties of soils.

Methods. The applied magnetic method includes a full range of field and laboratory studies. More detailed magnetic mineralogical methods of measurements are described in.

Results. On the basis of the diagram developed for the ratios of anhysteretic magnetic susceptibility to low-frequency magnetic susceptibility (χ_{ARM}/χ_{lf}) and anhysteretic magnetic susceptibility to the frequency dependence of magnetic susceptibility (χ_{ARM}/χ_{fd}), fine-grained magnetic

particles of lithogenic and bacterial origin were detected in the soils of experimental areas of Kyiv region. For Stari Petrivtsi, only one group of samples was mainly identified. In Demydiv, we found two groups: a larger one, marked in green, and a smaller one, marked in red. Finally, two equivalent groups were identified in the Ozero study site. According to the results of the thermomagnetic analysis of magnetic susceptibility, an unusual "tail" for soils was identified after 600 °C, which indicates the content of metallic iron. The content of heavy metals in the magnetic extraction of soils from objects of military defeat depends on the composition of the alloys of the weapons striking a specific place.

C o n c l u s i o n s . During the explosion of various types of ammunition, fragments of irregular shape are formed due to strong mechanical impact, and additional heating in the process leads to the formation of iron spherules. This complex physico-chemical process occurs as a result of the interaction of high-temperature gases, dust and molten metal. These objects are successfully identified by quick and cheap magnetic methods.

K e y w o r d s : magnetic susceptibility, soil, heavy metals, magnetization, war.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.