

## ГЕОФІЗИКА

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.02>

Олександр МЕНЬШОВ<sup>1</sup>, д-р геол. наук, ст. дослідник  
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453  
e-mail: menshov@knu.ua

Лідія ГОРОШКОВА<sup>2</sup>, д-р екон. наук, проф.  
ORCID ID: 0000-0002-7142-4308  
e-mail: goroshkova69@gmail.com

Олександр ГОЛУБ<sup>2</sup>, д-р хім. наук, проф.  
ORCID ID: 0000-0003-1823-2523  
e-mail: agolub@ukma.edu.ua

Станіслав ГОРОШКОВ<sup>1</sup>, студент  
ORCID ID: 0009-0009-4310-9165  
e-mail: stas20055008@gmail.com

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний університет "Києво-Могилянська академія"

## МАГНІТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОННИХ ВІДКЛАДІВ ТА ҐРУНТІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГЕОДИНАМІЧНИХ ЕКЗОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ НА ПРИКЛАДІ ЗАПОВІДНИКА ХОРТИЦЯ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)

**Вступ.** Під час військових дій території з різними типами землекористування зазнають значного негативного впливу. Природні та антропогенні комплекси природно-заповідного фонду острова Хортиця перебувають під постійною загрозою ракетних ударів, атак дронів, керованих авіабомб тощо. Додатковий тиск створює урбанізоване середовище та важка промисловість Запоріжжя. Крім цього, зникнення Каховського водосховища спричинило незворотні зміни у біорізноманітті, водному режимі та ландшафтних умовах прилеглих територій, зокрема острова Хортиця. Метою даної статті є оцінка змін природних і антропогенних комплексів заповідника Хортиця шляхом аналізу магнітних властивостей та визначення концентрації небезпечних хімічних сполук, зокрема важких металів, у донних відкладах осушених озер, що виникли після руйнування Каховської греблі, а також у ґрунтовому покриві.

**Методи.** Магнітну сприйнятливості вимірювали за допомогою лабораторного капамістка KLY-2 KappaBridge. Питому магнітну сприйнятливості ( $\chi$ ) визначалася шляхом нормалізації на масу. Вміст хімічних елементів аналізували за допомогою рентгенофлуоресцентного (XRF) аналізу, використовуючи обладнання компанії Elvatech.

**Результати.** Проведено дослідження донних відкладів озер Кам'яне, Прогній, Рисове та Піщане, а також ґрунтового покриву лісової ділянки. Виявлено високу магнітну сприйнятливості. У більшості точок спостереження зафіксовано досить високі значення  $\chi = 50\text{--}100 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ , тоді як окремі зразки демонструють ще вищі показники ( $\chi = 100\text{--}300 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ). Такі значення можуть бути пов'язані як із техногенним забрудненням, так і з літогенним походженням магнітних мінералів, що надходять із виходів кристалічного фундаменту в околицях Хортиці. Крім того, підвищену магнітну сприйнятливості зафіксовано у піщаних ґрунтах змішаного лісу. Значущу кореляцію магнітної сприйнятливості виявлено лише для хрому (коефіцієнт кореляції – 0,4). Водночас встановлено перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) важких металів: свинцю у 2–8 разів, цинку у 2–10 разів, хрому у 20–50 разів, міді у 10–20 разів, нікелю у 5–20 разів, кобальту у 5–8 разів.

**Висновки.** Магнітна сприйнятливості донних відкладів озер та ґрунтового покриву острова Хортиця є високою. Припускається, що це пов'язано з накопиченням літогенного матеріалу від вивітрювання гірських порід кристалічного фундаменту. Концентрація низки елементів, в першу чергу важких металів, перевищує ГДК у 2–50 разів. Однак значущий коефіцієнт кореляції зафіксовано лише між  $\chi$  та Cr (0,4). Отже, магнітні мінерали не мають генетичного зв'язку з матеріалами, які вміщують важкі метали. Тобто скоріше за все техногенний вплив відсутній.

**Ключові слова:** донні відклади, ґрунти, важкі метали, забруднення, магнітна сприйнятливості.

### Вступ

В умовах військових дій території з різними типами землекористування зазнають значних негативних впливів, а в окремих випадках і незворотних змін (Bonchkovskiy et al., 2025; Horoshkova et al., 2024; Menshov et al., 2024). Природні та штучні комплекси природно-заповідного фонду о. Хортиця (рис. 1) перебувають у зоні постійних обстрілів ракетами, дронами, керованими авіабомбами тощо. Додатковий вплив має урбанізоване середовище та важка промисловість Запоріжжя. Крім того, зникнення Каховського водосховища спричинило незворотні зміни у біорізноманітті, водному режимі та ландшафтних умовах прилеглих територій, зокрема і Хортиці.

Забруднення, природно-техногенні зміни, лісові пожежі, зокрема спричинені падінням уламків бойових частин дронів і ракет, а також осушення території відображаються у фізико-хімічних властивостях ґрунтів, донних відкладів і прибережних гірських порід (пісків,

супісків, уламків гірських порід). Ідентифікація цих змін здійснюється за допомогою комбінації геофізичних методів, зокрема швидкісних та економічно доступних магнітних вимірювань. Аналіз даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у середовищі геоінформаційних систем (ГІС) дають змогу створити просторові моделі забруднення, а подальші лабораторні дослідження хімічного складу матеріалів, особливо у зонах суттєвих аномалій, забезпечують детальну оцінку екологічного стану території.

Вимірювання магнітної сприйнятливості є простим і швидким методом, який дає надійне уявлення про ступінь забруднення важкими металами донних відкладів (Devanesan et al., 2020). Зміни магнітних властивостей осадів в озерних системах зазвичай пояснюються діяльністю людини у відповідних водозбірних басейнах, але зв'язок між магнетизмом осадів і інтенсивністю людської діяльності, як правило, погано встановлений, що обмежує використання магнітного методу в палеоекологічних

© Меньшов Олександр, Горошкова Лідія, Голуб Олександр, Горошков Станіслав, 2025

реконструкція (Yang et al., 2025). Магнітні властивості донних відкладів контролюються алохтонними і автохтонними магнітними частинками і відрізняються залежно від розташування в басейні озер (Lascu, & Plank, 2013). У берегових відкладеннях переважають уламкові магнітні частинки, тоді як літоральні відкладення характеризуються поєднанням бактеріальних магнітосом і уламкових частинок. Положення киснево-безкисневої межі розділу, яка може відбуватися у воді або всередині

товщі осаду, контролює глибину, на якій живуть магніто-тактичні бактерії, і визначає ступінь збереження їх ланцюгів магнітосом у поверхневих осадах (Chararro et al., 2017) відзначають, що аналіз даних озерних донних відкладень Аноніма свідчить про те, що основний поверхневий потік, розташований на південний захід від досліджуваного озера, контролює надходження уламків і просторову зміну складу осадів.



Рис. 1. Об'єкти дослідження донних відкладів у межах заповідника Хортиця

За допомогою комплексного аналізу (магнітні параметри, рентгеновська дифракція та інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є) у цих озерних відкладеннях було ідентифіковано мінерали магнетиту та грейгіту. Такі феримагнітні мінерали мають наддрібні розміри зерен ( $<0,1$  мкм). Магнітні параметри та немагнітні величини, проаналізовані за допомогою

багатофакторної статистики, виявляють значні відмінності між муловою фацією ( $\chi=109,6 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ) і піщаною фацією ( $\chi=82,1 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ). Отже, в озері Аноніма ідентифіковано та охарактеризовано чотири субсередовища осадження. Такий аналіз сприяє розумінню сучасних озерних динамічних та осадових процесів. Систематичне дослідження магнітної сприйнятливості та вмісту

важких металів осадових озер Лугу на південному заході Китаю (Wang et al., 2018) вказують на існування кореляційного зв'язку (за Пірсоном) з концентраціями важких металів (Al, Ti, Fe, Cr, Ni, Cu, Zn і Cd), а також з комплексним індексом забруднення Томлінсона (PLI). Отже, наявні істотні зв'язки джерел осадження та міграції між магнітними частинками та важкими металами. Значущі коефіцієнти кореляції між магнітними параметрами, важкими металами та PLI вказують на те, що магнітні параметри потенційно можна використовувати як індекс забруднення важкими металами озерних відкладень. Дослідження (Szczepaniak-Wnuk et al., 2020) виявило два можливих джерела забруднення у донних відкладах промислового регіону: транспортні потоки та викиди теплоелектростанцій. Не можна виключити вплив додаткового джерела забруднення, оскільки кількість сферул в осадових відкладеннях у центрі водойми була надзвичайно високою. Це дослідження демонструє, що магнітометрія має практичне застосування для виявлення та картографування забруднення важкими металами у водних системах. Крім того, результати (Kusza et al., 2023) стосуються просторового розподілу магнітної сприйнятливості та вмісту потенційно токсичних елементів (PTE) у поверхневому шарі донних відкладень у гирлі Вісли (Гданська затока, Польща). Вміст PTE та магнітна сприйнятливість відкладень показали дуже високу неоднорідність у межах досліджуваної території, залежно від розташування, гранулометричного складу та вмісту органічної речовини. Аналіз магнітної сприйнятливості є простим та ефективним методом, який можна використовувати для доповнення ідентифікації техногенних змін у водному середовищі.

Таким чином, метою даної статті є оцінка зміни природних та штучних комплексів заповідника Хортиця шляхом аналізу магнітних властивостей та визначення вмісту небезпечних хімічних сполук (зокрема, важких металів) у донних відкладеннях осушених озер, що утворилися після підризу Каховської греблі, а також ґрунтовому покриві. В подальшому кластеризація всіх видових ділянок острова (лісів, луків, прибережних зон, техногенних територій та гідрологічних об'єктів) за магнітними та іншими фізико-хімічними показниками ґрунтів дасть змогу визначити масштаби та характер змін екосистеми.

#### Методи

Острів Хортиця (рис. 1) в межах м. Запоріжжя є найбільшим островом долини Дніпра (довжина 11,2 км, ширина 2,4 км). Розташовується у Степовій агрокліматичній зоні України в підзоні різнотравно-типчаково-ковильних степів із теплим сухим континентальним кліматом. Геологічно основою служить південний край Українського кристалічного слуха, докембрійські породи віком близько 2,5 млрд років, передусім граніти, покриті шаром більш молодих осадових порід. У північній частині острова Хортиця над берегом піднімаються скелі, висота яких сягає 40–50 м, що спадають до півдня (Маринич, Пащенко, & Шищенко, 1985). У рельєфі панують долинно-балкові і заплавні форми. Основними ґрунотвірними породами, крім гранітів, служать лес та алювіальні піски, на яких формуються звичайні чорноземи, дернові, лугові і болотні ґрунти (Дубова, 2008). Характерною особливістю ґрунтів о. Хортиця є їх еродованість. Розвитку ерозії сприяє зимове промерзання ґрунтів, режим весняного сніготанення, літні зливи, значна довжина та крутість схилів, давність сільськогосподарського освоєння території, низька протиерозійна стійкість верхніх горизонтів ґрунтів. У межах Хортиці розташовані вісім великих озер:

Безім'яне, Кам'яне, Прогной, Домаха, Осокорове, Голоківське, Підкручне, Річище. Всі озера плавневої частини Хортиці мають вигляд простягнутих у меридіональному напрямку (за течією Дніпра) видовжених водойм різної величини. У східній частині Хортицьких плавнів їх 4, у західній – 12. Жодне з них не з'єднується з Дніпром. Крім того, є багато боліт, які або мають у плані форму невеликих озер, або (особливо у західній частині) прилягають до більших озер чи оточують дрібніші. Ми дослідили донні відклади озер Кам'яне, Прогній, Рисове та Піщане (рис. 1). Після підризу Каховського водосховища всі озера висохли. Відбір проб проводився з осушеного дна. Також було вивчено ґрунтовий покрив території у межах змішаного лісу. Загальний вигляд досліджуваних донних відкладів та ґрунтів наведено на рис. 2.

Вимірювання магнітної сприйнятливості проводили за допомогою лабораторного капамістка KLY-2 Kappabridge. Питому магнітну сприйнятливості ( $\chi$ ) визначено шляхом нормалізації до маси. Вміст елементів досліджено за допомогою XRF аналізу на апаратурі компанії Elvatech.

#### Результати

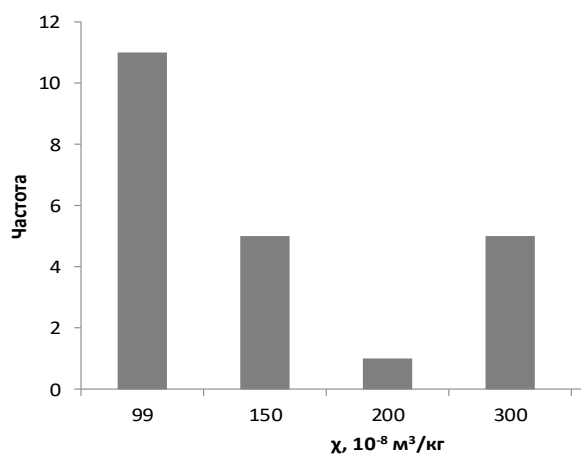
Результати розподілу значень магнітної сприйнятливості всієї колекції донних відкладів та ґрунтів о. Хортиця наведено на рис. 2. Магнітна сприйнятливості висока. Зазвичай для самих магнітних ґрунтів України вона не перевищує  $100 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  (Menshov, & Sukhorada, 2012). У нашому випадку досить високі значення  $\chi = 50\text{--}100 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  зафіксовано для більшості точок спостереження. У той же час частина колекції характеризується більш екстремально високими значеннями ( $\chi = 100\text{--}300 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ), що більше характерне або за наявності техногенного забруднення, або при літогенному генезисі детритових магнітних мінералів в осадах, що привносяться з виходів в околиці Хортиці кристалічного фундаменту. Крім того, високі значення магнітної сприйнятливості зафіксовано для піщаних ґрунтів змішаного лісу. Таким чином, для досліджених зразків донних відкладів висохлих озер та ґрунтів можна зробити припущення про формування високих значень магнітної сприйнятливості за рахунок привнесення техногенних магнітних частинок від роботи промисловості м. Запоріжжя протягом довгого періоду часу (десятьки і сотні років). Друга гіпотеза полягає у привнесенні високомагнітної фракції (магнетит) із кристалічного фундаменту, який є поруч та зазнавав впливу вивітрювання.

Наступним кроком став елементний аналіз зразків, результати якого наведено в табл. 1. Зафіксовано перевищення ГДК для свинцю у 2–8 разів, цинку у 2–10 разів, хрому в 20–50 разів, міді у 10–20 разів, нікелю в 5–20 разів, кобальту у 5–8 разів. Слід зауважити, що методологічно для осадів необхідно застосовувати інші ГДК, ніж для ґрунтів. Тобто зауважені перевищення можна вважати як орієнтовні. Гістограму розподілу вмісту Cr наведено на рис. 4. Найвищі значення зафіксовано для озера Рисове (300–500 мг/кг). Хоч одночасно і мінімальні значення зафіксовано для цього об'єкта (близько 20 мг/кг). Найбільш імовірні значення лежать у діапазоні 100–200 мг/кг і характерні для озер Прогній, Піщане, Кам'яне та ґрунтів лісової зони. Наведені дані можуть свідчити про доволі хаотичне накопичення матеріалу в донних відкладах та ґрунтах, що містять у своєму складі наведені елементи та магнітні мінерали.

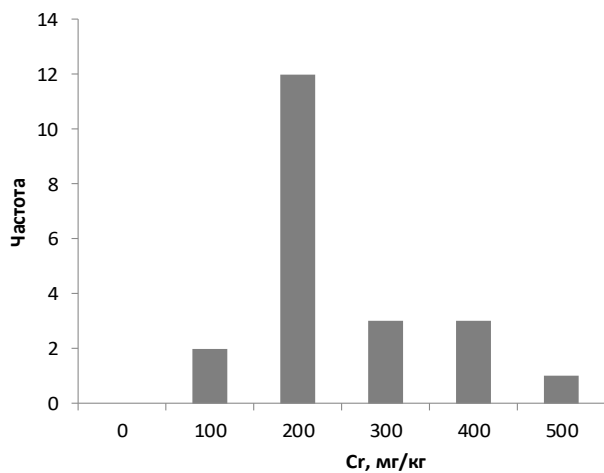
Для наведених вмістів елементів значущий коефіцієнт кореляції із магнітною сприйнятливості отримано лише для Cr (рис. 5). Він склав 0,4, що є значущим для даної вибірки згідно з (Fisher, & Frank, 1948).



**Рис. 2. Загальний вигляд досліджуваних донних відкладів та ґрунтів заповідника Хортиця:**  
а – типовий вигляд висушеного озера, б – відклади о. Рисове, в – відклади о. Прогній, г – лісові ґрунти, які зазнали впливу пожежі



**Рис. 3. Гістограма розподілу значень магнітної сприйнятливості**



**Рис. 4. Гістограма розподілу вмісту Cr у зразках**

Таблиця 1

Магнітна сприйнятливість та вміст деяких елементів у донних відкладах та ґрунтах заповідника Хортиця

| Зразок*           | χ   | Pb  | Zn   | Cr  | Fe     | Cu  | Ni  | Co |
|-------------------|-----|-----|------|-----|--------|-----|-----|----|
| ГДК для ґрунтів** |     | 32  | 23   | 6   |        | 3   | 4   | 5  |
| Рисове 1 верх     | 58  | 116 | 302  | 338 | 87214  | 98  | 91  | 45 |
| Рисове 2          | 230 | 121 | 566  | 307 | 96073  | 116 | 147 | 48 |
| Рисове 3          | 271 | 122 | 701  | 392 | 110033 | 199 | 160 | 54 |
| Рисове 4          | 250 | 219 | 1151 | 525 | 169910 | 205 | 270 | 85 |
| Рисове (2) 1 верх | 98  | 223 | 276  | 408 | 141629 | 190 | 172 | 70 |
| Рисове (2) 2      | 18  | 136 | 127  | 21  | 82570  | 79  | 99  | 44 |
| Рисове (2) 3      | 71  | 101 | 136  | 18  | 68105  | 58  | 81  | 38 |
| Прогній 1         | 92  | 6   | 330  | 144 | 88299  | 36  | 92  | 45 |
| Прогній 2         | 90  | 73  | 327  | 175 | 98118  | 37  | 185 | 51 |
| Прогній 3         | 103 | 50  | 288  | 143 | 75189  | 38  | 83  | 41 |
| Прогній верх      | 73  | 54  | 159  | 145 | 71004  | 38  | 62  | 36 |
| Прогній середина  | 179 | 88  | 257  | 237 | 98080  | 67  | 97  | 46 |
| Прогній 21 см низ | 122 | 90  | 251  | 277 | 96171  | 65  | 97  | 47 |
| Кам'яне 1         | 83  | 47  | 216  | 158 | 52373  | 73  | 53  | 40 |
| Кам'яне 2         | 86  | 46  | 194  | 149 | 48229  | 72  | 48  | 36 |
| Кам'яне 3         | 108 | 35  | 142  | 108 | 36276  | 49  | 43  | 29 |
| Піщане 1          | 102 | 65  | 168  | 159 | 72950  | 52  | 64  | 47 |
| Піщане 2          | 113 | 32  | 64   | 145 | 40380  | 23  | 28  | 27 |
| Піщане 3          | 91  | 36  | 51   | 135 | 35920  | 20  | 25  | 26 |
| Ліс 1             | 97  | 10  | 36   | 104 | 13067  | 4   | 18  | 14 |
| Ліс 2             | 208 | 27  | 98   | 166 | 26408  | 11  | 40  | 21 |
| Ліс 3             | 572 | 17  | 59   | 216 | 26159  | 9   | 24  | 20 |

\* Розмірність χ, 10<sup>-8</sup> м<sup>3</sup>/кг; елементи, мг/кг

\*\* ГДК наведено для ґрунтів відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. № 1325 "Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин" для рухомих форм, а за відсутності даних щодо рухомої форми – використано валову.

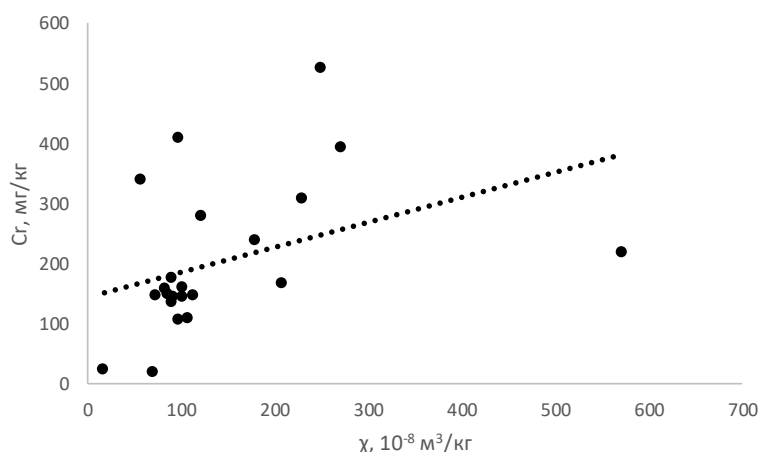


Рис. 5. Кореляційна залежність між χ та вмістом Cr

### Дискусія і висновки

Таким чином, значення магнітної сприйнятливості як для донних відкладів, так і для ґрунтів є високими ( $\chi=100\text{--}300 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ ). Вони перевищують відомі показники для чорноземів типових і звичайних, які є автоморфними регіональними ґрунтами для Запорізької області, у 1–5 разів. У той же час піщані ґрунти острова Хортиця порівняно з такими ж ґрунтами борових терас України є більш магнітними у 10–20 разів (Menshov, & Sukhorada, 2012). Отже, першою гіпотезою була наявність техногенного забруднення Запоріжжя та навколишньої урбанізованої території (Bondar et al., 2024). В даній роботі проаналізовано промислові пилкові викиди від найпотужніших джерел забруднення повітря Запоріжжя. Виділено два типи магнітних промислових викидів, що впливають на намагнічення міських ґрунтів: поширення крупнозернистих частинок, що містять магнетит, обмежується промисловою зоною, тоді як дрібніші магнітні сфери осідають на значній відстані від джерел забруднення,

приносячи у ґрунт значні кількості важких металів. Магнітна сприйнятливість, залишкова намагніченість насичення та ідеальна намагніченість ґрунтів демонструють сильний взаємозв'язок із вмістом важких металів та індексом забруднення PLI. Згідно з низкою публікацій (Ghobadi, Khoramnejadian, & Alipour, 2024; Delbecque et al., 2022; Menshov et al., 2021), в яких розглянуто зв'язки між магнітними параметрами та вмістом важких металів – має фіксуватися кореляційний та генетичний зв'язок між χ та свинцем, міддю, цинком, хромом і т. ін. У нашому випадку зафіксовано лише коефіцієнт кореляції 0,4 між магнітною сприйнятливістю і хромом (див. рис. 5). Для решти наведених у табл. 1 елементів такий зв'язок прямує до нуля. У той же час магнітна сприйнятливість висока, що більше характерно для суттєво забруднених урбаноземів (Liu et al., 2016). Водночас фіксується і підвищений вміст важких металів (якщо брати до уваги ГДК для ґрунтів). За даними китайських авторів, при  $\chi \leq 71 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  ґрунт вважається

незабрудненим;  $71 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг} < \chi \leq 162 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  ґрунт є слабозабрудненим;  $162 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг} < \chi \leq 253 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  – помірно забруднений, а  $\chi \geq 253 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$  відповідає сильнозабрудненим ґрунтам. Беручи до уваги окреслене вище, очевидним стає припущення про інший генезис магнітних мінералів у ґрунтах та елементного складу, який не пов'язує генетично ці параметри. Скоріше за все це накопичення в донних осадах озер, а також піщаному ґрунтовому покриві лісових ділянок заповідника Хортиця привнесених частинок від вивітрювання гірських порід кристалічного фундаменту, який оточує острів (Єнтін та ін., 2023). Мова йде про Середньопридніпровський тектонічний блок Українського щита в межах Дніпропетровської і Запорізької областей, який складений ґранітоїдеями, метабазитами, сланцями та залізитими породами. Наприклад, деякі геологічні утворення Українського щита можуть характеризуватися підвищенням вмістом діоксида титану ( $\text{TiO}_2$ ), заліза ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) та зниженням вмістом кремнезему ( $\text{SiO}_2$ ), магнітна сприйнятливості яких може досягати  $5000 \times 10^{-5}$  од. СІ. Зауважимо, що магнітні частинки скоріше за все є саме літогенного походження з домінуванням магнетиту. У наших подальших дослідженнях заплановано проведення магнітомінералогічного аналізу з метою з'ясування конкретних магнітних мінералів, їх розмірів та доменного стану.

**Подяки, джерела фінансування:** Дослідження виконувалися за проектом 0124U004208 "Еколого-економічна оптимізація логістичної інфраструктури в умовах війни та повоєнного відновлення України", що реалізується у рамках програми наукових робіт, науково-технічних та інфраструктурних проєктів, які фінансуються за кошти спеціального фонду, отриманих за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій "Горизонт 2020".

**Внесок авторів:** Олександр Меньшов – концептуалізація, ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Лідія Горшкова – ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Олександр Голуб – методологія, валідація та аналіз даних; Станіслав Горшков – вимірювання та обробка даних.

#### Список використаних джерел

- Дубова, О.В. (2008). Еколого-агрохімічна оцінка та фізичні властивості ґрунтів заплавної зони острова Хортиця. *Вісник ЗНУ. Біологія*, 2, 53–59.
- Єнтін, В.А., Гінтов, О.Б., Орлюк, М.І., & Марченко, А.В. (2023). Локальні магнітні аномалії Українського щита як індикатори прояву різновікових етапів осередково-каналного магнітизму. *Геофизический журнал*, 45(2), 44–62.
- Маринич, А.М., Пашченко, В.М., & Шищенко, П.Г. (1985). *Природа Украинской ССР. Ландшафты и физико-географическое районирование*. Наук. думка.
- Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594.
- Bondar, K. M., Tsiupa, I. V., Sachko, A. V., & Nasiedkin, I. I. (2024). Pre-war situation with soil pollution in the city of Zaporizhzhia: Metallurgical industry center in Ukraine – Characterized by magnetic, geochemical and microscopy methods. *Acta Geophysica*, 72(2), 1355–1375.
- Chaparro, M. A., Chaparro, M. A., Córdoba, F. E., Lecomte, K. L., Gargiulo, J. D., Barrios, A. M., ... & Böhnelt, H. N. (2017). Sedimentary analysis and magnetic properties of Lake Anónima, Vega Island. *Antarctic Science*, 29(5), 429–444.
- Delbecque, N., Van Ranst, E., Dondeyne, S., Mouazen, A. M., Vermeir, P., & Verdoodt, A. (2022). Geochemical fingerprinting and magnetic susceptibility to unravel the heterogeneous composition of urban soils. *Science of the Total Environment*, 847, 157502.
- Devanesan, E., Chandrasekaran, A., Sivakumar, S., Freny Joy, K. M., Najam, L. A., & Ravisankar, R. (2020). Magnetic susceptibility as proxy for heavy metal pollution detection in sediment. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 44, 875–888.
- Fisher R.A., & Frank Y. (1948). *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*, 6th ed., published by Longman Group, Ltd., London.
- Ghobadi, F., Khoramnejadian, S., & Alipour, S. (2024). Correlation of soil magnetic susceptibility with heavy metals and physico-chemical profile. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 19(4), 255–261.

Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. *Ekonomika APK*, 31(6), 10–26. <https://doi.org/10.32317/ekon.apk/6.2024.10>

Kusza, G., Kubowicz, A., Kłostowska, Ż., Łuczak, K., Łęczyński, L., & Hulisz, P. (2023). Environmental effects of potentially toxic elements and the magnetic susceptibility distribution in the surface bottom sediments in the Vistula estuary (Gulf of Gdańsk, Poland). *Journal of Soils and Sediments*, 23(9), 3499–3512.

Lascu, I., & Plank, C. (2013). A new dimension to sediment magnetism: Charting the spatial variability of magnetic properties across lake basins. *Global and Planetary Change*, 110, 340–349.

Liu, D., Ma, J., Sun, Y., & Li, Y. (2016). Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China. *Catena*, 139, 53–60.

Menshov, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1.

Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine. In *85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme)* (Vol. 2024, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenig, Ukraine. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 739–750. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00240-7>

Szczepaniak-Wnuk, I., Górka-Kostrubiec, B., Dytłow, S., Szwarczewski, P., Kwapiński, P., & Karasiński, J. (2020). Assessment of heavy metal pollution in Vistula river (Poland) sediments by using magnetic methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 24129–24144.

Wang, L., Hu, S., Ma, M., Wang, X., Wang, Q., Zhang, Z., & Shen, J. (2018). Responses of magnetic properties to heavy metal pollution recorded by lacustrine sediments from the Lugu Lake, Southwest China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 26527–26538.

Yang, W., Fu, H., Zhang, Y., & Ouyang, T. (2025). Sediment magnetic records of human activities in Lake Chaohu Basin over the past 166 years. *Anthropocene*, 100468.

#### References

- Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594.
- Bondar, K. M., Tsiupa, I. V., Sachko, A. V., & Nasiedkin, I. I. (2024). Pre-war situation with soil pollution in the city of Zaporizhzhia: Metallurgical industry center in Ukraine – Characterized by magnetic, geochemical and microscopy methods. *Acta Geophysica*, 72(2), 1355–1375.
- Chaparro, M. A., Chaparro, M. A., Córdoba, F. E., Lecomte, K. L., Gargiulo, J. D., Barrios, A. M., ... & Böhnelt, H. N. (2017). Sedimentary analysis and magnetic properties of Lake Anónima, Vega Island. *Antarctic Science*, 29(5), 429–444.
- Delbecque, N., Van Ranst, E., Dondeyne, S., Mouazen, A. M., Vermeir, P., & Verdoodt, A. (2022). Geochemical fingerprinting and magnetic susceptibility to unravel the heterogeneous composition of urban soils. *Science of the Total Environment*, 847, 157502.
- Devanesan, E., Chandrasekaran, A., Sivakumar, S., Freny Joy, K. M., Najam, L. A., & Ravisankar, R. (2020). Magnetic susceptibility as proxy for heavy metal pollution detection in sediment. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science*, 44, 875–888.
- Dubova, O. V. (2008). Ecological-agrochemical assessment and physical properties of soils in the floodplain zone of Khortytsia Island. *Bulletin of ZNU. Biology*, 2, 53–59.
- Fisher R.A., & Frank Y. (1948). *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*, 6th ed. Longman Group, Ltd., London.
- Ghobadi, F., Khoramnejadian, S., & Alipour, S. (2024). Correlation of soil magnetic susceptibility with heavy metals and physico-chemical profile. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 19(4), 255–261.
- Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. *Ekonomika APK*, 31(6), 10–26. <https://doi.org/10.32317/ekon.apk/6.2024.10>
- Kusza, G., Kubowicz, A., Kłostowska, Ż., Łuczak, K., Łęczyński, L., & Hulisz, P. (2023). Environmental effects of potentially toxic elements and the magnetic susceptibility distribution in the surface bottom sediments in the Vistula estuary (Gulf of Gdańsk, Poland). *Journal of Soils and Sediments*, 23(9), 3499–3512.
- Lascu, I., & Plank, C. (2013). A new dimension to sediment magnetism: Charting the spatial variability of magnetic properties across lake basins. *Global and Planetary Change*, 110, 340–349.
- Liu, D., Ma, J., Sun, Y., & Li, Y. (2016). Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China. *Catena*, 139, 53–60.
- Marynych, A. M., Pashchenko, V. M., & Shyshchenko, P. G. (1985). *Nature of the Ukrainian SSR. Landscapes and physical-geographical zoning*. Naukova Dumka.

Menshov, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1.

Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine. In *85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme)* (Vol. 2024, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenig, Ukraine. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 739–750. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00240-7>

Szczepaniak-Wnuk, I., Górka-Kostrubiec, B., Dytłow, S., Szwarczewski, P., Kwapiński, P., & Karasiński, J. (2020). Assessment of heavy metal pollution

in Vistula river (Poland) sediments by using magnetic methods. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 24129–24144.

Wang, L., Hu, S., Ma, M., Wang, X., Wang, Q., Zhang, Z., & Shen, J. (2018). Responses of magnetic properties to heavy metal pollution recorded by lacustrine sediments from the Lugu Lake, Southwest China. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 26527–26538.

Yang, W., Fu, H., Zhang, Y., & Ouyang, T. (2025). Sediment magnetic records of human activities in Lake Chaohu Basin over the past 166 years. *Anthropocene*, 100468.

Yentín, V. A., Hintov, O. B., Orlyuk, M. I., & Marchenko, A. V. (2023). Local magnetic anomalies of the Ukrainian Shield as indicators of different-age stages of focal-channel magmatism. *Geophysical Journal*, 45(2), 44–62.

Отримано редакцією журналу / Received: 14.12.24

Прорецензовано / Revised: 15.01.25

Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Oleksandr MENSHOV<sup>1</sup>, DSc (Geol.), Senior Researcher,  
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453  
e-mail: menshov@knu.ua

Lidiia HOROSHKOVA<sup>2</sup>, DSc (Econom.), Prof.,  
ORCID ID: 0000-0002-7142-4308  
e-mail: goroshkova69@gmail.com

Alexander GOLUB<sup>2</sup>, DSc (Chem.), Prof.,  
ORCID ID: 0000-0003-1823-2523  
e-mail: agolub@ukma.edu.ua

Stanislav HOROSHKOV<sup>1</sup>, Student  
ORCID ID: 0009-0009-4310-9165  
e-mail: stas20055008@gmail.com

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>National University of Kyiv Mohyla Academy

## MAGNETIC STUDIES OF SEDIMENTS AND SOILS AS A TOOL FOR DETECTION OF DANGEROUS GEODYNAMIC EXOGENIC PROCESSES ON THE EXAMPLE OF THE KHORTYTSYA RESERVE

**Background.** During the military activity, areas with different types of land use experience significant negative impacts. The natural and anthropogenic complexes of the Khortytsia Nature Reserve are under constant threat from missile strikes, drone attacks, guided aerial bombs, and other forms of military activity. Additional pressure is exerted by the urban environment and heavy industry of Zaporizhzhia. Moreover, the disappearance of the Kakhovka Reservoir has led to irreversible changes in biodiversity, water regimes, and landscape conditions in the surrounding areas, including Khortytsia Island. The aim of this study is to assess the changes in the natural and anthropogenic complexes of the Khortytsia Reserve by analyzing magnetic properties and determining the concentrations of hazardous chemical compounds, particularly heavy metals, in the bottom sediments of dried-up lakes formed after the destruction of the Kakhovka Dam, as well as in the soil.

**Methods.** Magnetic susceptibility was measured using a laboratory KLY-2 Kappabridge. Mass-specific magnetic susceptibility ( $\chi$ ) was determined by normalization to mass. The content of chemical elements was analyzed by X-ray fluorescence (XRF) analysis using Elvatech equipment.

**Results.** The study considers the bottom sediments of Lake Kamyane, Prohnyi, Rysove, and Pishchane, as well as the soil of the forested area. High magnetic susceptibility was detected. Most observation points recorded relatively high values of  $\chi=50\text{--}100\times10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg, while some samples exhibited even more extreme values ( $\chi=100\text{--}300\times10^{-8}$  m<sup>3</sup>/kg). These elevated values may be associated with either anthropogenic pollution or the lithogenic origin of magnetic minerals transported from crystalline basement outcrops in the vicinity of Khortytsia. Additionally, increased magnetic susceptibility was observed in the sandy soils of the mixed forest. A significant correlation with magnetic susceptibility was found only for chromium (correlation coefficient is 0.4). At the same time, exceedances of the maximum allowable concentrations of heavy metals were recorded: lead by 2–8 times, zinc by 2–10 times, chromium by 20–50 times, copper by 10–20 times, nickel by 5–20 times, and cobalt by 5–8 times.

**Conclusions.** The magnetic susceptibility of the bottom sediments of lakes and the soil of Khortytsia Island is high. It is assumed that this is due to the accumulation of lithogenic material from the weathering of crystalline basement rocks. The concentration of a number of elements, primarily heavy metals, exceeds the MPC by 2–50 times. However, a significant correlation coefficient was recorded only between  $\chi$  and Cr (0.4). Therefore, magnetic minerals do not have a genetic connection with materials containing heavy metals. That is, most likely there is no anthropogenic impact.

**Keywords:** sediments, soil, heavy metals, pollution, magnetic susceptibility.

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.