

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.07>

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

Лідія ГОРОШКОВА², д-р екон. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-7142-4308
e-mail: goroshkova69@gmail.com

Станіслав ГОРОШКОВ¹, студент
ORCID ID: 0009-0009-4310-9165
e-mail: stas20055008@gmail.com

Тургай ДІНДАРОГЛУ³, д-р наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-2165-8138
e-mail: turgay.dindaroglu@ktu.edu.tr

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Національний університет "Києво-Могилянська академія", Київ, Україна

³Технічний університет Караденіз, Трабзон, Туреччина

КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ ВМІСТУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ТА МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРУНТІВ ТА ДОННИХ ВІДКЛАДІВ ОЗЕР ЗАПОВІДНИКА "ХОРТИЦЯ"

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Вступ. Природні та антропогенно змінені комплекси природно-заповідного фонду острова Хортиця зазнають значного впливу внаслідок людської діяльності, техногенних процесів і військових факторів. Важливо також враховувати трансформації, пов'язані з регулюванням течії річки Дніпро, експлуатацією Дніпрогесу та наслідками руйнування Каховського водосховища. Усі ці чинники спричинили суттєві зміни у водному режимі та структурі ландшафтів території. Основною метою запропонованого дослідження є вивчення змін природних і антропогенних ландшафтів заповідника "Хортиця" шляхом аналізу магнітних властивостей та вмісту токсичних хімічних елементів (зокрема, важких металів) у донних відкладах осушених озер, що виникли внаслідок руйнування Каховської греблі, а також у ґрунтовому покриві.

Методи. Лабораторні вимірювання магнітної сприйнятливості проводили за допомогою капамістка KLY-2. Далі визначали питому магнітну сприйнятливість χ (10^{-6} м³/кг), нормалізуючи отримані значення на масу зразка. Вміст хімічних елементів визначали методом рентгенофлуоресцентного аналізу (XRF), використовуючи прилад ElvaX Pro — лабораторний РФА-аналізатор, здатний виявляти елементи в діапазоні від Na (11) до U (92).

Результати. Значення магнітної сприйнятливості в досліджених зразках ґрунтів є надзвичайно високими ($\chi=97\text{--}572 \times 10^{-6}$ м³/кг). Зафіксовано істотне перевищення ГДК для цинку (у 2–5 разів), хрому (у 20–30 разів), міді (у 1,1–3 рази), нікелю (у 4–10 разів) та кобальту (у 3–4 рази). Подібні показники, ймовірно, пов'язані з наслідками процесів горіння, а також з антропогенним впливом, зокрема промисловим забрудненням, яке походить із Запоріжжя. Водночас характер змін магнітної сприйнятливості та її кореляція із вмістом важких металів донних відкладів у межах озер Хортиці свідчить про інші закономірності. Це дає змогу зробити висновок про існування механізму формування підвищеного магнітного сигналу, що пов'язаний із переважанням речовини літогенного походження, ймовірно принесеної з навколишніх кристалічних порід Українського щита.

Висновки. Донні відклади озер Хортиці становлять надзвичайно цінний природний матеріал для ретроспективного аналізу формування магнітних частинок, накопичення важких металів і уламкових гірських порід різного походження з метою оцінки як природного, так і антропогенного впливу на екосистеми заповідника "Хортиця" впродовж останніх кількох століть.

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

Вступ

Природні та штучні комплекси природно-заповідного фонду острова Хортиця перебувають у зоні підвищеного антропогенного, техногенного та військового впливів. Крім того, важливим є врахування зміни функціонування р. Дніпро, Дніпрогесу та руйнування Каховського водосховища. Окремі дії призвели до суттєвих змін водних і ландшафтних умов.

Головною метою запропонованих досліджень є аналіз трансформацій природних і антропогенних ландшафтів заповідника "Хортиця" через вимірювання магнітних характеристик та вмісту токсичних хімічних речовин (зокрема, важких металів) у донних відкладах осушених озер, що сформувалися після руйнування Каховської греблі, а також у ґрунтах. Проводиться типізація природного та антропогенного впливу на різні ландшафти острова, лісових, лучних, прибережних, техногенних і гідрологічних, у тому числі з використанням магнітних вимірювань та інших фізико-хімічних властивостей ґрунтів для оцінки масштабів і особливостей змін екосистеми. У нашій попередній роботі (Меньшов та ін., 2025) отримано результати, що показники магнітної сприйнятливості (χ ,

MS) як у донних відкладах, так і в ґрунтах демонструють високі значення ($\chi=100\text{--}300 \times 10^{-6}$ м³/кг), що у 1–5 разів перевищують типові рівні для звичайних і типових чорноземів, основних автоморфних ґрунтів Запорізького регіону. Водночас піщані ґрунти острова Хортиця мають магнітну сприйнятливості у 10–20 разів вищу, ніж аналогічні ґрунти борових терас України (Menshov, & Sukhorada, 2012). Встановлено, що високі показники магнітної сприйнятливості в донних відкладах озер та піщаних ґрунтах лісових ділянок заповідника "Хортиця" пов'язані з накопиченням частинок, принесених у результаті вивітрювання гірських порід кристалічного фундаменту, що оточує острів. Йдеться про Середньодніпровський тектонічний блок Українського щита, розташований у межах Дніпропетровської та Запорізької областей, який представлений граніто-гнейсами, метабазитами, сланцями та залізними породами. Проте роль антропогенного забруднення від урбанізованого середовища Запоріжжя (Bondar et al., 2024) порівняно незначна. Важливим при цьому є врахування небезпечних геологічних процесів території розташування критичної інфраструктури (Vyzhva et al., 2010).

© Меньшов Олександр, Горошкова Лідія, Горошков Станіслав, Діндароглу Тургай, 2025

Магнітна сприйнятливість вимірюється на озерних відкладеннях і використовується як проксі для ідентифікації джерел надходження уламкового матеріалу, ерозії ґрунту, для знаходження кореляційних зв'язків між осадовим матеріалом різних озер одного геологічного комплексу (Blumentritt, & Lascau, 2015). Ретроспективний аналіз зміни магнітної сприйнятливості, вмісту органічного вуглецю, азоту, As, Cd, Hg, Pb, хлорорганічних пестицидів на прикладі озер Байяндянь (Guo, Huo, & Ding, 2015), які були використані для аналізу змін водного середовища внаслідок діяльності людини. Рівень забруднення органічними речовинами та важкими металами поступово зростає і накопичується в донних відкладах, а магнітну сприйнятливості можна використовувати як швидкий, простий і неруйнівний інструмент для оцінки антропогенного впливу. Крім того, в роботі (Haltia-Hovi et al., 2010) магнітні властивості осадів вказують на серію змін у їх складі протягом голоцену, які добре корелюють з літологією осадів і вмістом органічного вуглецю. Магнітні властивості відрізняються за концентрацією дрібнозернистого магнетиту. Слід зауважити (Павлунь, Гайовський, & Шваєвський, 2024), що морфологія, морфометрія та фазовий склад мінералів руд Середнього Придніпров'я Українського щита дають підстави для виокремлення низки послідовно утворених мінеральних асоціацій стійкого складу, зокрема допродуктивний комплекс представлений пірит-кварцовою асоціацією (з магнетитом) і охоплює три парагенезиси: магнетит-кварцовий (435–390 °C), піротин-пірит-кварцовий із магнетитом (395–320 °C) і кварц-сидеритовий із перевідкладеним магнетитом (280–240 °C). Такі утворення можуть бути джерелом підвищеного магнітного сигналу донних відкладів озер заповідника "Хортиця". Наприклад, зерна магнетиту з озера Ізок (Нунавут, Канада) і озера Халфмайл (Нью-Брансвік, Канада), а також з прилеглих територій, було досліджено за допомогою скануючої електронної мікроскопії, мікросонда, мас-спектрометрії та оптичної мікроскопії (Makvandi et al., 2016). Результати свідчать про те, що Si, Ca, Zr, Al, Ga, Mn, Mg, Ti, Zn, Co, Ni та Cr належать до вмісних корінних порід. Титан є індикатором теллуричного і теригенного петрофону, пов'язаного з основними і кислими породами. Тоді як ансамбль кремнію, кальцію і магнію може бути пов'язаний із вивільненням кальцію і магнію при руйнуванні плагіоклазів і темнобарвних мінералів, що є діагенетичним процесом. Кремній – типовий рецикліт, тобто його вміст збільшується при руйнуванні корінних порід і формуванні уламкових порід, їх метаморфізації і повторенні відповідного циклу. Змінний склад метаморфічного магнетиту свідчить про те, що хімічний склад контролюється складом вмісних порід, ступенем метаморфізму та летючістю кисню.

Таким чином, наведені вище результати означають, що комбінація магнітного та геохімічного аналізів допомагають успішно диференціювати літогенні та антропогенні компоненти в озерних відкладах (Yunginger et al., 2018).

Методи

Загальний вигляд дослідженої території із врахуванням змін рівня води у Дніпрі біля острова Хортиця, а також пункти дослідження наведено на рис. 1. Представлено територію дослідження на космічних знімках супутника "LANDSAT5", загальний вигляд дослідженої території із розташуванням дослідних озер, острів Хортиця 10.2014 до підриву Каховського водосховища та острів Хортиця 07.2024 після підриву Каховського водосховища.

Загальний опис ґрунтового покриву, агрокліматичної зони, ландшафтів та досліджуваних озер наводиться в нашій роботі (Меньшов та ін., 2025). Хортиця розташовується в межах м. Запоріжжя та є найбільшим островом долини Дніпра. Ландшафтні умови характерні для степу України, у рельєфі панують долинно-балкові і заплавні форми. Основними ґрунотвірними породами, крім гранітів, служать лес і алювіальні піски, на яких формуються звичайні чорноземи, дернові, лугові і болотні ґрунти (Дубова, 2008). Автори досліджували донні відклади озер Кам'яне, Прогній, Рисове та Піщане (рис. 1).

Характеристика Середньопридніпровського мегаблока Українського щита. Результати наших попередніх досліджень (Меньшов та ін., 2025) схиляють до гіпотези, що визначальну роль у формуванні магнітних властивостей та елементного складу донних відкладів озер заповідника "Хортиця" відіграє дрібнодисперсний уламковий матеріал кристалічного фундаменту Українського щита. Тому детальніше розглянемо його характеристики. Хортиця зосереджена в межах Середньопридніпровського мегаблока Українського щита (Щербак, 1993). Серед ключових геоструктурних елементів фундаменту давніх платформ провідну роль відіграють архейські гранітно-зеленокам'яні області, які вирізняються характерними та чітко вираженими в глобальному масштабі геологічними ознаками. Вказані риси практично повністю проявляються в межах Середньопридніпровського мегаблока Українського щита. Даний мегаблок стабілізувався впродовж пізнього архею та в подальшій геологічній історії функціонував як відносно жорстке тектонічне утворення, зберігаючи структурну цілісність і впливаючи на формування регіональних геодинамічних процесів. У контексті петрологічної характеристики гранітоїдів Середньопридніпровської гранітно-зеленокам'яної області основними породотвірними компонентами мігматитових ареалів є гранітоїди. У загальному наближенні їх можна розподілити на дві великі групи: гранітоїди різноманітного петрографічного складу, переважно гнейсової будови, що тісно пов'язані з гнейсово-мігматитовою товщею та беруть участь у складчастих рухах; післяскладчасті (рідше пізньоскладчасті) масивні граніти, які формують структурно-речовинно відокремлені масиви та менш масштабні тіла. У межах Середньопридніпровської гранітно-зеленокам'яної області найбільше поширені гранітоїди першої групи, плагіоклазові, менше – мікроклін-плагіоклазові породи змінного складу. Їхній складчасто-гнейсовий вигляд однозначно вказує на їх синкінематичну природу. Тісний зв'язок цих гранітоїдів з мігматитами подібного складу, наявність у них численних, різного ступеня гранітизованих, непереміщених реліктів метаморфічних порід, а також інші ознаки свідчать про автохтонне походження більшості із цих утворень. Разом з тим досить звичними є гранітоїди, для яких більш імовірним є припущення про їх алохтонний характер. Геологічні та геохронологічні дані однозначно свідчать про складну та тривалу історію формування гранітоїдів цього типу, їх багаторазову участь у складчастих процесах, що супроводжувалися змінами мінерального складу й структурною перебудовою. Гранітоїди другої групи, виходячи з їхнього геологічного положення, формувалися в умовах поступової консолідації земної кори та проявів ранніх етапів розломної тектоніки. Вони мають чітко виражені активні контакти як з метаморфічними породами аульської та конксько-верхівцевської серій, так і з гранітоїдами першої групи.



а



б



в

Рис. 1. Територія дослідження на космічних знімках супутника "LANDSAT5" острова Хортиця:
а – загальний вигляд дослідженої території з розташуванням дослідних озер; б – острів Хортиця 10.2014 до підриву Каховського водосховища; в – острів Хортиця 07.2024 після підриву Каховського водосховища

В комплексі об'єднуються кілька породних асоціацій, склад яких змінюється від тоналітів, плагіогранітів до лейкоплагіогранітів (Толстой та ін., 2003). Характерною особливістю гранітоїдів комплексу є успадкованість ними особливостей речовинного складу субстрату, за рахунок якого вони власне сформувалися. В них також постійно трапляються скіаліти вмісних порід, серед яких визначаються біотитові, амфіболітові гнейси, зрідка амфіболіти. Плагіогранітоїди відстежуються у вигляді незначних за розміром лінзоподібних тіл переважно в межах геантиклінальних підняттях і поширені практично на всій території мегаблока. Спостерігається прояв процесів мікроклінізації.

Більш детально розглянемо плагіограніти запорізькі, які трапляються саме у східній частині Запорізько-Томківського куполоподібного підняття: м. Запоріжжя, район Верхня Хортиця, 500 м на південний захід від залізничної колії, кар'єр. Плагіограніти запорізькі характеризуються відносно однорідною будовою і відсутністю реліктів метаморфічних порід. На окремих ділянках плагіограніти інтенсивно калішпатизовані й насичені

малопотужними жилами апліто-пегматоїдних гранітів. Визначаються зонки дроблення й катаклазу, що пояснюється безпосередньою близькістю плагіогранітів до зони Хортицького розлому. Структура гіпідіоморфнозерниста, бластогранітова. Мінеральний склад: плагіоклаз (49–66 %), кварц (27–36 %), калієвий польовий шпат (1–8 %), біотит (1–5 %). Акцесорні мінерали (0,5 %): апатит, сфен, циркон. Вторинні мінерали (2,5 %): серицит, епідот, дрібна луска мусковіту, карбонат, хлорит по біотиту. У запорізьких плагіогранітах плагіоклаз утворює зерна табличчастої форми розміром 0,2–1,6 мм, зрідка трапляються вкрапленики до 4,0 мм. Плагіоклаз інтенсивно заміщується серицитом, з країв зерен розвиваються альбітові облямівки розкиснення. Калішпат присутній у невеликій кількості, нерівномірно розвивається на окремих ділянках і представлений ксеноморфними зернами мікрокліну з розпливчастою, гратчастою структурою й полум'яними пертитами. Калішпат пізніший, має реакційні взаємовідносини з плагіоклазом, замінюючи його. Біотит розвивається у міжзерновому просторі у вигляді одиничних лусочок і скупчень. Колір бурий, бурувато-

зелений. Біотит заміщується дрібною лускою мусковіту (Толстой та ін., 2003).

Лабораторні вимірювання магнітної сприйнятливості проводилися за допомогою капамістка KLY-2, потім розраховувалася питома магнітна сприйнятливість χ (10^{-8} м³/кг) шляхом нормалізації до маси. Вміст елементів було досліджено шляхом XRF аналізу за допомогою інструменту ElvaX Pro, що являє собою лабораторний рентгенофлуоресцентний аналізатор для широкого діапазону елементів від Na (11) до U (92) завдяки використанню нової потужної рентгенівської трубки з напругою анода до 60 кВ, струмом до 1000 мкА та SDD детектора надвеликої площі 40 мм.

Результати

Аналіз та інтерпретація результатів дослідження магнітної сприйнятливості та елементного складу донних відкладів і ґрунтів усієї колекції острова Хортиця із врахуванням результатів опублікованих у статті (Меньшов та ін., 2025) продемонструвало необхідність розбиття колекції на різні групи (кластери), оскільки хімічний, літологічний склад, а також вміст та походження магнітних мінералів, скоріше за все, має різний, не пов'язаний на пряму один з одним генезис. Зразки ґрунту, відібрані в лісовій місцевості, зазнали впливу пожежі, яка була індукована антропогенним чинником (можливо уламки

збитого дрону або ракети). Крім того, у цих ґрунтах більшою мірою превалює педогенний характер магнетизму, тобто нормальний для ґрунтового покриву розвиток генетичних горизонтів із врахуванням ландшафтно-кліматичних умов острова. Їх магнітна сприйнятливість є високою ($\chi=97\text{--}572\times 10^{-8}$ м³/кг). Перевищення ГДК для свинцю не зафіксовано. У той же час відзначається підвищення ГДК для цинку у 2–5 разів, хрому в 20–30 разів, міді у 1,1–3 рази, нікелю в 4–10 разів, кобальту у 3–4 рази. Такі характеристики ми пов'язуємо із процесами горіння, а також можливим антропогенним впливом від промислового забруднення Запоріжжя (Bondar et al., 2024).

Іншою є картина магніто-геохімічної моделі донних відкладів озер. На рис. 2 наведено гістограму розподілу значень магнітної сприйнятливості донних відкладів озер заповідника "Хортиця". Розподіл близький до нормального. Найімовірніші значення лежать у діапазоні $\chi=80\text{--}150\times 10^{-8}$ м³/кг. Сюди потрапляють зразки озер Прогній, Кам'яне та Піщане. Ліва асиметрія розподілу із значеннями $\chi=17\text{--}80\times 10^{-8}$ м³/кг складена переважно зразками осади з озера Рисове. Ліва асиметрія розподілу з високими значеннями $\chi=200\text{--}300\times 10^{-8}$ м³/кг також складена переважно зразками Рисового, тобто маємо дві підвибірки зразків для даного озера.

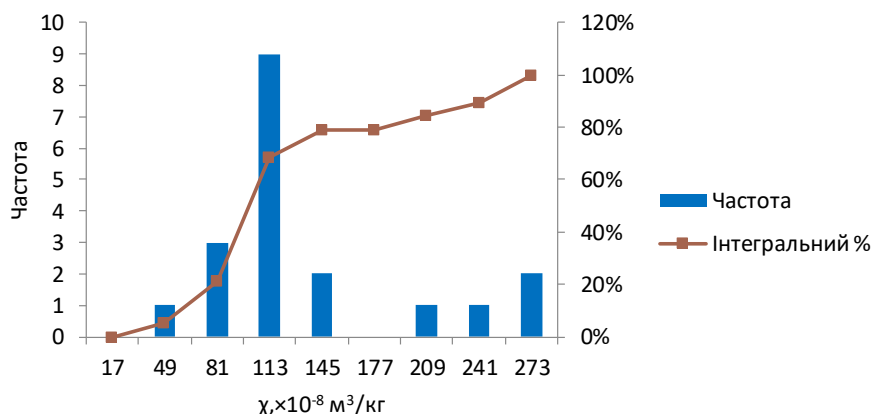


Рис. 2. Гістограма розподілу значень магнітної сприйнятливості донних відкладів озер заповідника "Хортиця"

На рис. 3 наводяться гістограми розподілу вмісту важких металів у зразках донних відкладів озер заповідника "Хортиця", для яких є значущим коефіцієнт кореляції із магнітною сприйнятливістю. Такими елементами визначено Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Hg, Pb, Cr. Розподіл близький до нормального для Fe, Co, Hg. У той же час розподіл подібний до логнормального для Ni, Cu, Zn, Pb, Cr. ГДК для Fe сягає 19974 мкг/кг, що застосовується для ґрунтів степу України). Тобто уся вибірка демонструє перевищення ГДК у 1,5–7 разів. Для рухомої форми Co ГДК приймається як 5 мкг/кг 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". Отже, перевищення сягає 5–18 разів. Для Ni перевищення ГДК становило 6–60 разів, для Cu – 7–30 разів, для Zn – 2–30 разів (найбільш імовірні значення вибірки перевищують у 5–10 разів). Частина зразків не фіксує перевищення для Hg, а для решти ГДК перевищується у 2–4 рази. Крім того, Pb перевищує у 2–5 разів, а Cr – у 15–70 разів (одне із найвищих перевищень ГДК).

На рис. 4 представлено графіки залежностей між магнітною сприйнятливістю та вмістом важких металів у

зразках донних відкладів озер острова Хортиця. Коефіцієнт кореляції є значущим для досліджуваної вибірки, якщо він перевищує 0,35 з імовірністю похибки 0,05. Таким чином, отримано коефіцієнти кореляції χ : Fe=0,52, Co=0,61, Ni=0,58, Cu=0,52, Zn=0,79, Hg=0,50, Pb=0,40, Cr=0,38.

Слід зауважити, що високі зв'язки з магнітною сприйнятливістю отримано і для деяких інших елементів: Si=-0,55, S=0,49, Sr=0,35. Однак дані залежності слід аналізувати за іншим алгоритмом.

Дискусія та висновки

Результати наших попередніх досліджень магнітних властивостей донних відкладів озер та ґрунтового покриву заповідника "Хортиця" (Меньшов та ін., 2025) дали змогу зробити припущення про три основні форми формування магнітного сигналу у відповідних природних об'єктах, а також накопичення важких металів та інших хімічних елементів. Перший пов'язаний із природними факторами розвитку ґрунтового покриву та накопичення матеріалу у донних осадах. Другий має у своїй основі факт техногенного забруднення за рахунок привнесення речовин із розташованої поруч промислової агломерації міста Запоріжжя. Зокрема, за результатами (Bondar

et al., 2024) металургійні підприємства Запоріжжя, інтегровані в житлове середовище міста, спричиняють значне збагачення верхнього шару ґрунту шкідливими речовинами, включаючи дрібні тверді частинки, що містять важкі метали та магнітні оксиди заліза. Було виявлено два типи магнітних промислових викидів, які сприяють намагніченню міського ґрунту: поширення грубозернистих частинок, що містять магнетит, обмежене промисловою зоною, тоді як менші магнітні сфери осідають далеко від джерел забруднення, приносячи значну кількість важких металів у ґрунт. Можна припустити, що

дані ультрадисперсні частинки могли накопичуватися і в межах острова Хортиця. Дослідження магнітних властивостей ґрунтів з метою виявлення кореляції із показниками забруднення в Україні вказують на підвищені концентрації Cu, Ni, Zn та фіксують позитивну кореляцію з магнітною сприйнятливістю (Bondar, & Tsiupa, 2024). Високі значення магнітної сприйнятливості порівняно з фоновими фіксуються у зразках ґрунту, відібраних поблизу доріг з інтенсивним рухом та в зонах впливу інших техногенних процесів (Menshov et al., 2023).

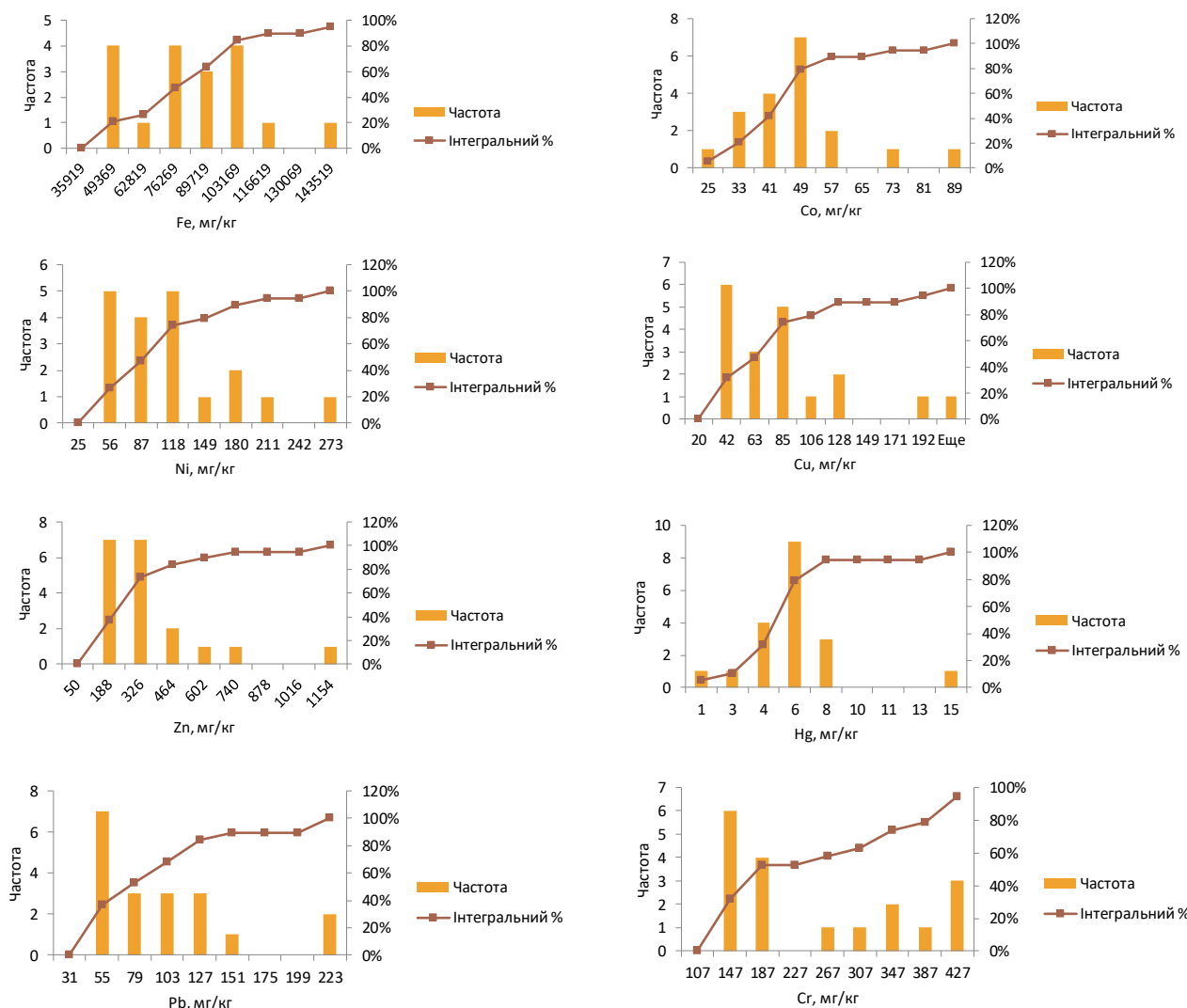


Рис. 3. Гістограма розподілу вмісту важких металів у зразках донних відкладів озер заповідника "Хортиця", для яких є значущим коефіцієнт кореляції з магнітною сприйнятливістю

У той же час поведінка магнітної сприйнятливості, взаємозв'язки із вмістом важких металів донних відкладів у межах озер о. Хортиця демонструють дещо інші закономірності. Тому очевидним стає висновок про третій генезис формування підвищеного магнітного сигналу. Він пов'язаний із предомінуванням привнесеної речовини літогенного генезису від розташованих навкруги кристалічних порід Українського щита. Зокрема, мова може йти про силікат-магнетитові і магнетит-силікатні джеспіліти, силікат-магнетит-гематити, гематит-магнетитові джеспіліти продуктивної товщі, кумінгтонітові шари з магнетитом, альбітом, магнезіальною залізистою

слюдою, егірин-магнетитові та гематит-магнетитові джеспіри, рудні магнетито-кварцові, залізнослюдово-магнетитові шари, хлорит-карбонат-магнетит-кварцові роговики, кварц-хлоритові, карбонат-кварц-магнетит-хлоритові сланці і т. ін. (Usenko, 2018). Отже, граніто-гнейси, метабазити, сланці та залізисті породи і деякі інші геологічні формації Українського щита демонструють підвищений вміст оксиду титану (TiO_2) та оксиду заліза (Fe_2O_3) за одночасно зниженого вмісту діоксиду кремнію (SiO_2). Магнітна сприйнятливість таких утворень може сягати 5000×10^{-5} одиниць CI (Єнтін та ін., 2023).

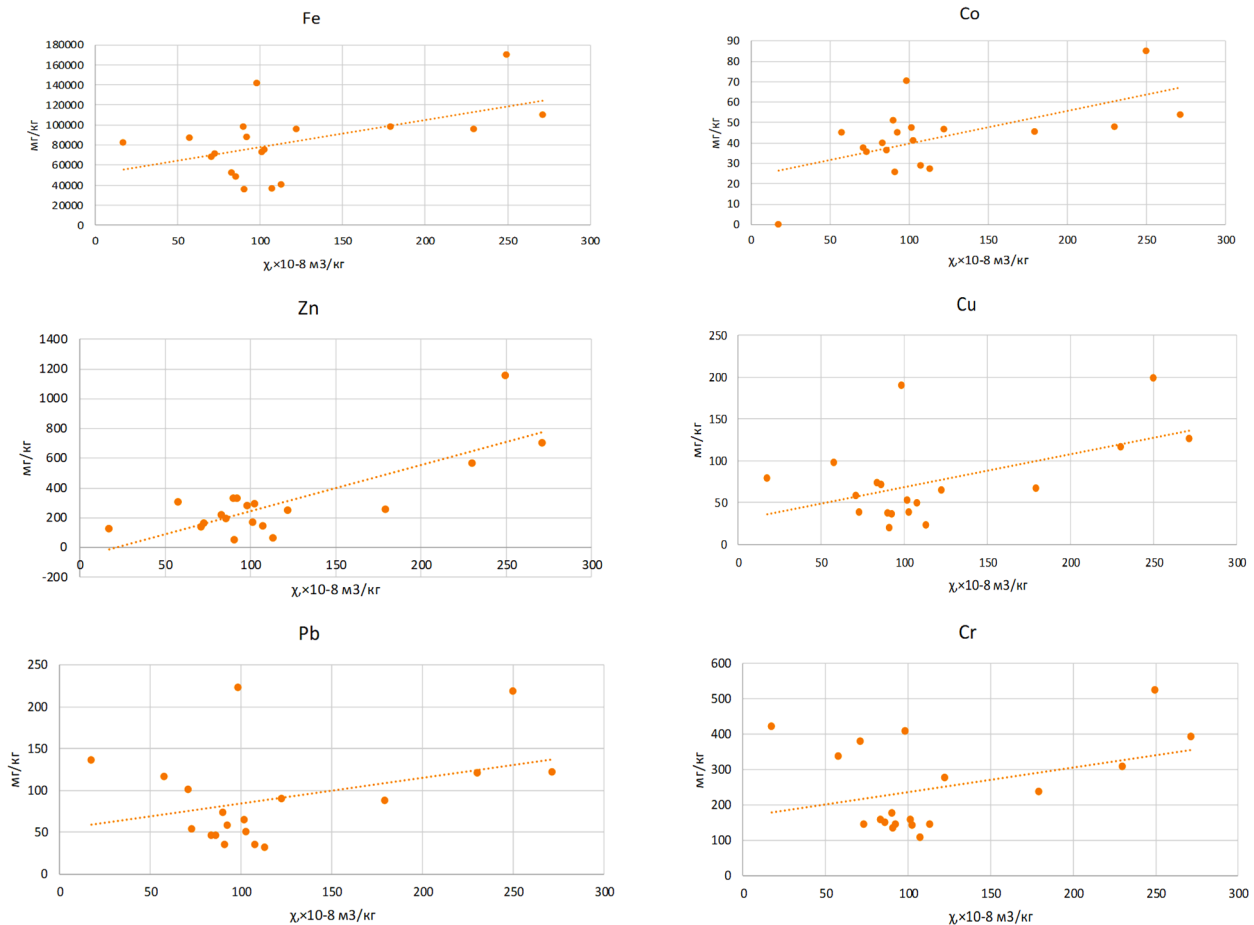


Рис. 4. Графіки залежностей між магнітною сприйнятливістю та вмістом важких металів у зразках донних відкладів озер заповідника "Хортиця", для яких є значущим коефіцієнт кореляції

Магнітна сприйнятливість є чутливим, швидким і точним методом для виявлення процесів і особливостей ґрунтоутворення. Зокрема, в роботі (Cervi et al., 2019) показано, як аналіз головних компонентів і кластерний аналіз групують ґрунти відповідно до належності до різних природних і антропогенних ландшафтів. Зокрема, виділено розташування вододілів, схилів, ділянки низин, пісковиків, дна долин. Ці матеріали вказують на те, що магнітна сприйнятливість є ефективним показником властивостей ґрунту для групування та ідентифікації педогенних і геохімічних сегментів (типізація) у межах ландшафту. Крім того, в роботі (Barrios et al., 2012) продемонстровано аналіз головних компонент і отримано висновки, що χ є важливою властивістю, яку можна використовувати для ідентифікації сегментів ландшафту, оскільки кореляція цієї властивості в межах першої головної компоненти була високою. Сегменти ландшафту диференційовано за допомогою аналізу головних компонент та кластерного аналізу, використовуючи лише властивості з вищою дискримінаційною здатністю. Кластерний аналіз магнітної сприйнятливості повітряно-сухої дрібноземної речовини (MS ADFE), магнітної сприйнятливості загальної піщаної фракції (MS TS) та магнітної сприйнятливості глинистої фракції (MS CI) дав змогу сформувати три групи, які узгоджуються з поділом сегментів, установленим у польових умовах. Групування за допомогою кластерного аналізу показало, що χ є інструментом, який може полегшити ідентифікацію сегментів ландшафту та дозволити картографування більш однорідних областей у подібних місцях. Зауважимо, що

для типізації ландшафтних умов з різними моделями мілливості за допомогою статистичного протоколу з даними магнітної сприйнятливості можна використовувати й інші атрибути ґрунту. Наприклад, колір ґрунту, який є коваріантним атрибутом факторів та процесів ґрунтоутворення (Siqueira et al., 2015). У нашому випадку дослідження на основі кластерного аналізу є наступним кроком. На даному етапі ми виокремили лісовий ландшафт Хортиці, ґрунти якого зазнали впливу пожежі, яка превалює над потенційним накопиченням важких металів від викидів промисловості Запоріжжя. Також було виділено ландшафт осушеного дна озер, донні відклади якого характеризуються підвищенням магнітної сприйнятливості, що скоріше за все пов'язується із привнесенням літогенного матеріалу від гірських порід Українського щита. На нашу думку, в усіх дослідних об'єктах Хортиці наявний техногенний пил та важкі метали антропогенного походження. Важливим кроком є розробка ефективної технології розбавки техногенного сигналу та високомагнітного сигналу від процесів горіння та привнесеного літогенного матеріалу.

Отже, донні відклади озер острова Хортиця є надзвичайно цінним природним об'єктом для ретроспективного вивчення накопичення магнітної речовини, важких металів, уламкових гірських порід різного генезису з метою визначення природного та техногенного впливу на екосистеми заповідника протягом кількох століть.

Внесок авторів: Олександр Меньшов – концептуалізація, ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Лідія Горюшкова – ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті;

Станіслав Горошков – вимірювання та обробка даних; Тургай Діндароглу – валідація та аналіз даних.

Подяка та 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 проектів, 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".

Список використаних джерел

- Дубова, О.В. (2008). Еколого-агрохімічна оцінка та фізичні властивості ґрунтів заплавної зони острова Хортиця. *Вісник ЗНУ. Біологія*, 2, 53–59.
- Снтіні, В. А., Гінтов, О. Б., Орлюк, М. І., & Марченко, А. В. (2023). Локальні магнітні аномалії Українського щита як індикатори прояву різновікових етапів осередково-каналного магматизму. *Геофизический журнал*, 45(2), 44–62.
- Меньшов, О., Горошкова, Л., Голуб, О., & Горошков, С. (2025). Магнітні дослідження донних відкладів та ґрунтів як інструмент виявлення небезпечних геодинамічних екзогенних процесів на прикладі заповідника Хортиця. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(108), 15–21. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.02>
- Павлунь, М., Гайовський, О., & Шваєвський, Т. (2024). Термобарогеохімія процесів рудоутворення на золоторудному родовищі балка Широка (Український щит). *Мінералогічний збірник*, 74, 45–55.
- Толстой М.І., Гасанов Ю.Л., & Костенко Н.В. (2003). *Петрогеохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання*. ВПЦ "Київський університет".
- Усенко, О. (2018). Розвиток українського щита 2,7–2,3 млрд років тому. Факти та попередні висновки. *Доповіді Національної академії наук України*, 12, 61–70. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.12.061>
- Щербак, Н.П. (1993). *Гранитоїди Українського щита. Петрохімія, геохімія, рудоносність*. Наукова думка.
- Barrios, M. D. R., Marques Junior, J., Panosso, A. R., Siqueira, D. S., & La Scala Junior, N. (2012). Magnetic susceptibility to identify landscape segments on a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 1073–1082.
- Blumentritt, D. J., & Lascau, I. (2015). *A comparison of magnetic susceptibility measurement techniques and ferrimagnetic component analysis from recent sediments in Lake Pepin (USA)*.
- 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.
- Bondar, K. M., & Tsiupa, I. V. (2024). Long-and short-term pollution effect in megapolis assessed from magnetic and geochemical measurements on soils, tree trunk bark, and air filters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1041.
- Cervi, E. C., Maher, B., Polisei, P. C., de Souza Junior, I. G., & da Costa, A. C. S. (2019). Magnetic susceptibility as a pedogenic proxy for grouping of geochemical transects in landscapes. *Journal of Applied Geophysics*, 169, 109–117.
- Guo, W., Huo, S., & Ding, W. (2015). Historical record of human impact in a lake of northern China: Magnetic susceptibility, nutrients, heavy metals and OCPs. *Ecological Indicators*, 57, 74–81.
- Haltia-Hovi, E., Nowaczyk, N., Saarinen, T., & Plessen, B. (2010). Magnetic properties and environmental changes recorded in Lake Lehmilampi (Finland) during the Holocene. *Journal of Paleolimnology*, 43, 1–13.
- Makvandi, S., Ghasemzadeh-Barvarz, M., Beaudoin, G., Grunsky, E. C., McClenaghan, M. B., & Duchesne, C. (2016). Principal component analysis of magnetite composition from volcanogenic massive sulfide deposits: Case studies from the Izok Lake (Nunavut, Canada) and Halfmile Lake (New Brunswick, Canada) deposits. *Ore Geology Reviews*, 72, 60–85.
- 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, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1.
- Siqueira, D. S., Marques Jr, J., Pereira, G. T., Teixeira, D. B., Vasconcelos, V., Júnior, O. C., & Martins, E. D. S. (2015). Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. *Catena*, 135, 149–162.

Yunginger, R., Bijaksana, S., Dahrin, D., Zulaikah, S., Hafidz, A., Kirana, K. H., ... & Fajar, S. J. (2018). Lithogenic and anthropogenic components in surface sediments from Lake Limboto as shown by magnetic mineral characteristics, trace metals, and REE geochemistry. *Geosciences*, 8(4), 116.

References

- Barrios, M. D. R., Marques Junior, J., Panosso, A. R., Siqueira, D. S., & La Scala Junior, N. (2012). Magnetic susceptibility to identify landscape segments on a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 1073–1082.
- Blumentritt, D. J., & Lascau, I. (2015). *A comparison of magnetic susceptibility measurement techniques and ferrimagnetic component analysis from recent sediments in Lake Pepin (USA)*.
- 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.
- Bondar, K. M., & Tsiupa, I. V. (2024). Long-and short-term pollution effect in megapolis assessed from magnetic and geochemical measurements on soils, tree trunk bark, and air filters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1041.
- Cervi, E. C., Maher, B., Polisei, P. C., de Souza Junior, I. G., & da Costa, A. C. S. (2019). Magnetic susceptibility as a pedogenic proxy for grouping of geochemical transects in landscapes. *Journal of Applied Geophysics*, 169, 109–117.
- 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 [in Ukrainian].
- Guo, W., Huo, S., & Ding, W. (2015). Historical record of human impact in a lake of northern China: Magnetic susceptibility, nutrients, heavy metals and OCPs. *Ecological Indicators*, 57, 74–81.
- Haltia-Hovi, E., Nowaczyk, N., Saarinen, T., & Plessen, B. (2010). Magnetic properties and environmental changes recorded in Lake Lehmilampi (Finland) during the Holocene. *Journal of Paleolimnology*, 43, 1–13.
- Makvandi, S., Ghasemzadeh-Barvarz, M., Beaudoin, G., Grunsky, E. C., McClenaghan, M. B., & Duchesne, C. (2016). Principal component analysis of magnetite composition from volcanogenic massive sulfide deposits: Case studies from the Izok Lake (Nunavut, Canada) and Halfmile Lake (New Brunswick, Canada) deposits. *Ore Geology Reviews*, 72, 60–85.
- Menshov, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1.
- Menshov, O., Horoshkova, L., Golub, A., & Horoshkov, S. (2025). Magnetic studies of sediments and soils as a tool for detection of dangerous geodynamic exogenic processes on the example of the Khortytsya reserve. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 15–21 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.02>
- 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.
- Pavlun, M., Gaiovsky, O., & Shvaevsky, T. (2024). Thermobarogeochemistry of ore-formation processes at the balka Shyroka gold-ore deposit (Ukrainian shield). *Mineralogical Collection*, 74, 45–55 [in Ukrainian].
- Shcherbak N.P. (1993). *Granitoids of the Ukrainian Shield. Petrochemistry, geochemistry, ore potential*. Naukova Dumka [in Russian].
- Siqueira, D. S., Marques Jr, J., Pereira, G. T., Teixeira, D. B., Vasconcelos, V., Júnior, O. C., & Martins, E. D. S. (2015). Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. *Catena*, 135, 149–162.
- Tolstoy M.I., Hasanov Yu.L., Kostenko N.V. (2003). *Petrogeochemistry and petrophysics of granitoids of the Ukrainian Shield and some aspects of their practical use*. PPC "Kyiv University" [in Ukrainian].
- Usenko, O. (2024). The development of the Ukrainian Shield was 2.7–2.3 billion years ago. Facts and preliminary conclusions. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 61–70 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.12.061>
- Yentini, V. A., Gintov, O. B., Orlyuk, M. I., & Marchenko, A. V. (2023). Local magnetic anomalies of the Ukrainian Shield as indicators of the manifestation of different-age stages of focal-channel magmatism. *Geophysical Journal*, 45(2), 44–62 [in Ukrainian].
- Yunginger, R., Bijaksana, S., Dahrin, D., Zulaikah, S., Hafidz, A., Kirana, K. H., ... & Fajar, S. J. (2018). Lithogenic and anthropogenic components in surface sediments from Lake Limboto as shown by magnetic mineral characteristics, trace metals, and REE geochemistry. *Geosciences*, 8(4), 116.

Отримано редакцію журналу / Received: 04.01.25

Прорецензовано / Revised: 03.03.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

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

Lidiia HOROSHKOVA², DSc (Econom.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-7142-4308
e-mail: goroshkova69@gmail.com

Stanislav HOROSHKOV¹, Student
ORCID ID: 0009-0009-4310-9165
e-mail: stas20055008@gmail.com

Turgay DINDAROGLU³, DSc, Prof.
ORCID ID: 0000-0003-2165-8138
e-mail: turgay.dindaroglu@ktu.edu.tr

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²National University of Kyiv Mohyla Academy, Kyiv, Ukraine

³Karadeniz Technical University, Faculty of Forestry, Trabzon, Türkiye

COMPREHENSIVE MODEL OF HEAVY METALS CONTENT AND MAGNETIC PROPERTIES OF SOIL AND SEDIMENTS OF LAKES OF KHORTYSYA RESERVE

Background. *Natural and anthropogenically modified complexes of the nature reserve fund of Khortytysya Island are subject to significant pressure from human activity, technogenic processes, and military factors. It is also important to take into account the transformations caused by the regulation of the Dnipro River's flow, the operation of the DniproHES hydroelectric station, and the consequences of the destruction of the Kakhovka Reservoir. All these factors have led to substantial changes in the water regime and landscape structure of the area. The main objective of the proposed study is to investigate changes in natural and anthropogenic landscapes of the Khortytysya reserve through the analysis of magnetic properties and the content of toxic chemical elements (in particular, heavy metals) in the bottom sediments of desiccated lakes formed as a result of the destruction of the Kakhovka Dam, as well as in the soil.*

Methods. *Laboratory measurements of magnetic susceptibility were conducted using a KLY-2 kappabridge. The mass-specific magnetic susceptibility χ ($10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$) was then calculated by normalizing the obtained values to the sample mass. The elemental composition was determined using X-ray fluorescence (XRF) analysis with the ElvaX Pro instrument, a laboratory XRF analyzer capable of detecting elements in the range from Na (11) to U (92).*

Results. *The magnetic susceptibility values in the analyzed soil samples are extremely high ($\chi=97\text{--}572 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$). Significant exceedances of maximum permissible concentrations were recorded for zinc (2–5 times higher), chromium (20–30 times), copper (1.1–3 times), nickel (4–10 times), and cobalt (3–4 times). These elevated values are likely associated with combustion processes, as well as anthropogenic impact, particularly industrial pollution originating from Zaporizhzhia. At the same time, the behavior of magnetic susceptibility and its correlation with heavy metal content in the bottom sediments of Khortytysya lakes demonstrates different patterns. This suggests the existence of an additional mechanism contributing to the elevated magnetic signal, related to the predominance of lithogenic material likely derived from surrounding crystalline rocks of the Ukrainian Shield.*

Conclusions. *The bottom sediments of Khortytysya lakes represent an extremely valuable natural archive for retrospective analysis of magnetic particle formation, accumulation of heavy metals, and clastic rocks of various origins, aimed at assessing both natural and anthropogenic influences on the ecosystems of the Khortytysya reserve over the past several centuries.*

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.