

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.832+634.12

К. Бондар, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
E-mail: ks_bondar@ukr.netІ. Цюпа, інж. 1 кат.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, УкраїнаА. Король, пров. хімік
Центральна геофізична обсерваторія
пр. Науки, 39, корп. 2, м. Київ, 03028, Україна**МАГНІТНИЙ МЕТОД ПРИ ОЦІНЦІ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ ЗАПОРІЖЖЯ:
ЕКОЛОГО-ГЕОХІМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ***(Рекомендовано членом редакційної колегії канд. геол. наук О.І. Меньшовим)*

Робота присвячена вивченню магнітних властивостей та вмісту важких металів у ґрунтах м. Запоріжжя – потужного промислового центру. В ході дослідження встановлено, що низькочастотна магнітна сприйнятливість (χ_{LF}) ґрунтів міста змінюється від 61×10^{-8} до $4087 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ при медіані $271 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, а частотна залежність магнітної сприйнятливості (K_{fd}) ґрунтів Запоріжжя становить 0-13,3% при медіані 2,0%. Низькі χ_{LF} та високі значення K_{fd} , притаманні ґрунтам у природному стані, спостерігаються на правобережній західній околиці міста, а низькі значення $K_{fd} < 2\%$ при $> 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ пов'язані з промисловою зоною, де сконцентровані заводи металургійного комплексу. Визначені кореляційні зв'язки між магнітними параметрами та вмістом важких металів у ґрунтах дозволяють рекомендувати магнітний метод для діагностики й моніторингу екологічного стану м. Запоріжжя.

Побудовані карти-схеми просторових розподілів χ_{LF} та показника накопичення забруднення (PLI) показують, що р. Дніпро перешкоджає розповсюдженню пило-газового забруднення на правобережну частину міста.

Ключові слова: низькочастотна магнітна сприйнятливість ґрунтів, важкі метали, показник накопичення забруднення, Запоріжжя.

Вступ. Запоріжжя – потужний промисловий центр, де на відносно невеликій площі сконцентровано ряд підприємств чорної та кольорової металургії, теплоенергетики, атомної енергетики, хімії, машинобудування тощо. Неминучим наслідком промислового розвитку є тенденція до забруднення компонентів природного середовища, деградації ґрунтів, негативного впливу на здоров'я та якість життя людей.

За оцінкою Департаменту екології та природних ресурсів облдержадміністрації за останні роки екологічна ситуація в місті не покращується, за перше півріччя 2015 року спостерігається збільшення обсягів викидів основних забруднювачів [26].

Постановка проблеми. Місто Запоріжжя потребує оцінки та постійного ведення локального моніторингу екологічного стану навколишнього середовища. Методичне забезпечення контролю та прогнозу забруднення районів міських територій представляє ряд не повністю взаємопов'язаних регламентів, процедур та систем оцінок екологічної безпеки, що не дозволяє однозначно інтерпретувати якість природного середовища. Не повною мірою використовуються можливості сучасних засобів математичного моделювання для прогнозу забруднення міських територій промисловими підприємствами [26]. Існує потреба у розробці комплексної методології картування, оцінки й моніторингу стану ґрунтового покриву в місті на підставі даних експресдіагностики. З цієї метою успішно може використовуватися магнітний метод, застосування якого має ґрунтуватися на надійних засадах прямих екогеохімічних вимірювань. Суть магнітного методу полягає у вивченні розподілу магнітних властивостей (найчастіше вимірюється магнітна сприйнятливість) у ґрунтах та інших компонентах довкілля за допомогою польових та лабораторних приладів [6]. Підставою для його застосування на регіональному рівні є доведена наявність значущих зв'язків між магнітними параметрами та вмістом екоотоксикантів, що вказує на спільне джерело магнітного і геохімічного забруднення та характеризує його.

Магнітна сприйнятливість, що характеризує концентрацію магнітних мінералів у ґрунтовому покриві, є важливим та інформативним показником техногенного навантаження на території. Внаслідок викидів промислових та теплоенергетичних підприємств, магнітні частинки потрапляють з атмосферними опадами, пилом, аерозолями до ґрунтів. У ґрунтах ці частинки накопичуються, трансформуються та здатні залишатися там ще тривалий час, навіть якщо об'єми виробництва заводів-політантів зменшуються.

На сьогодні напрацьований значний досвід застосування магнітного методу при екологічних дослідженнях на територіях металургійних районів [6, 7, 11, 13-14, 27].

Зокрема, в роботах [7, 11] за картами магнітної сприйнятливості визначений ареал забруднення ґрунтового покриву у провінції Верхня Сілезія, агломерації Катовіце (Польща) – потужному індустріальному вузлі з найвищою щільністю важкої промисловості в Європі, який включає, 2800 підприємств, серед них 17 металургійних заводів і 16 електростанцій. У багатьох роботах повідомляється про кореляцію магнітних параметрів з вмістом важких металів. Зокрема, у Катовіце коефіцієнти кореляції між магнітною сприйнятливістю та вмістом Zn та Pb зростають зі збільшенням обсягів пилових викидів [6]. У Північній Астурії (Іспанія) коефіцієнти кореляції між магнітною сприйнятливістю та вмістами Cu, Cd, Pb, Zn збільшуються з наближенням до промислових об'єктів, які емітують у повітря техногенні аерозолі [14]. Магнітна сприйнятливість забруднених важкими металами (ВМ) ґрунтів Удмуртії має міцний зв'язок з металами Pb, Cu, Zn, Cr та Ni [27]. Прямий зв'язок вмісту ВМ зі сприйнятливістю ґрунтів встановлений у м. Чусовий (Середній Урал, РФ), що дозволяє використовувати капаметрію для картування забрудненості ґрунтів Ni, Cu, Zn, Cr, Mn [13].

Мета роботи. За допомогою геохімічних даних обґрунтувати застосування магнітного методу при оцінці та моніторингу забруднення ґрунтового покриву м. Запоріжжя.

Територія дослідження. Запоріжжя розташоване на півдні Східноєвропейської рівнини у степовій зоні з характерним рівнинним ландшафтом. Ґрунти міста відносяться до типу реграданих ґрунтів на лесових породах, представлені чорноземами звичайними малогумусними. Відсоток площі природних елементів дуже низький (10-20% від загальної площі кожного виду ландшафту) [22].

Клімат як чинник виникнення екологічних проблем можна охарактеризувати як м'який та комфортний для населення за характеристиками середньорічних температур (+8,2-9°C), великою кількістю сонячних днів. Разом з тим, недостатня кількість опадів (у середньому, 450 мм на рік) сприяє задушливості, що негативно впливає на людський організм, запиленості та забрудненню атмосфери.

Територія міста розділена на дві частини р. Дніпро. Водні ресурси р. Дніпро є основним джерелом питного водопостачання м. Запоріжжя та промислових підприємств, зокрема гірничо-металургійного комплексу, енергетичної галузі тощо.

Запоріжжя відноситься до Придніпровського машинобудівельного району, з провідними галузями важкого та середнього машинобудування: станків, транспортних, енергетичних, електротехнічних та сільськогосподарських машин та техніки.

Найбільшу кількість викидів забруднюючих речовин в атмосферу здійснюють 11 основних промислових підприємств, обсяги викидів яких за 2014 р. склали [18]:

- БАТ "Запоріжсталь" – 59,288 тис т/рік (з них: *речовини у вигляді суспендованих твердих частинок* – 4,155 тис т/рік; *сполук азоту та сірки* – 8,065 тис т/рік);
- ПАТ "Запорізький завод феросплавів" – 15,709 тис т/рік (3,901 тис т/рік; 1,815 тис т/рік);
- ПАТ "Запоріжжюкс" – 2,996 тис т/рік (0,341 тис т/рік; 1,205 тис т/рік);
- ПАТ "Запорізький абразивний комбінат" – 1,890 тис т/рік (0,812 тис т/рік; 0,209 тис т/рік);
- ПАТ "Український графіт" – 1,285 тис т/рік (0,203 тис т/рік; 0,425 тис т/рік);
- ПАТ "Дніпроспецсталь" – 683 т/рік (115 т/рік; 242 т/рік);
- ДП "Запорізький титано – магнієвий комбінат" – 0,853 тис т/рік (0,103 тис т/рік; 0,14 тис т/рік);
- ПАТ "Запоріжвогнетрив" – 365 т/рік (78 т/рік; 120 т/рік);
- ПАТ "Запоріжсклофлюс" – 157 т/рік (52 т/рік; 27 т/рік);
- ПАТ "Мотор Січ" – 492 т/рік (108 т/рік; 147 т/рік);
- ПАТ "Запорізький автомобілебудівний завод" – 173,397 тис т/рік (12,651 тис т/рік; 17,428 тис т/рік).

Катастрофічного обсягу набуло утворення твердих побутових та промислових відходів. Так, упродовж 2014 р. у Запоріжжі та його передмістях було накопичено 1918,3 тис т токсичних твердих промислових відходів. У структурі відходів переважають речовини III-го та IV-го класів небезпеки (99,97%). 88,1% всіх промислових звалищ було сформовано за рахунок комбінату "Запоріжсталь" (62,5% загальноміського обсягу), заводу феросплавів (13,8%), алюмінієвого комбінату (11,8%) [18].

Всі адміністративні райони міста за рівнем концентрації промислового виробництва можна розділити на 2 типи: з високою концентрацією – Заводський, Ленінський, Орджонікідзевський, Шевченківський (від 24 до 30 підприємств); зі значною концентрацією виробництва (від 8 до 17) – Хортицький, Жовтневий, Комунарський.

Концентрація шкідливих домішок у повітрі навіть над центральними районами міста може перевищувати ГДК у 5 разів. У районі промислової зони вона досягає 10 ГДК. До вагомих забруднювачів відноситься транспорт.

Структура шкідливих викидів промислових підприємств значно відрізняється між собою. Так, виробництва "Запоріжсталь" забруднюють довкілля азотними сполуками (понад 60%), фтором (13%), залізом (8,9%), нікелем (12,9%), фенолами (0,8%). Вони викликають захворювання дихальних шляхів, головного мозку, печінки, нирок. На титано-магнієвому комбінаті переважають викиди неорганічного пилу (73,5%), кремнієвих сполук (13,8%), хлористого водню (10,6%). Купол забруднення над "Дніпроспецсталлю" складає переважно пил (41,1%). Це також підвищує частоту різноманітних захворювань [17].

Відбір зразків та лабораторні дослідження. Для визначення особливостей латерального розподілу магнітних характеристик і важких металів методом конверту відібрано 60 ґрунтових зразків. Відбір проб ґрунту проведено відповідно до вимог ГОСТ 17.4.4.02-84 у рамках багаторічного контролю за забрудненням території важкими металами, що здійснюється ЦГО ДСНС України. У лівобережній частині міста 26 зразків відібрано в Заводському районі, на території основної промислової зони, де розташовані підприємства "Запоріжсталь", Запорізький завод феросплавів, "Український графіт", "Запоріжжюкс" та Запорізький титано-магнієвий комбінат. Навколо Запорізького автомобілебудівного заводу відібрано 6 зразків, у Першотравневому районі, 8 – на території підприємства "Мотор Січ" та Запорізького абразивного комбінату. У правобережній частині міста відбір проводився в селітебній та промисловій зонах Ленінського та Хортицького районів, Осипенківському житловому масиві.

На всіх зразках ґрунтів у лабораторних умовах були здійснені вимірювання низькочастотної та високочастотної магнітної сприйнятливості (χ_{LF} та χ_{HF} відповідно) за допомогою приладу Bartington з датчиком MS 2B Dual Frequency Sensor (Велика Британія). Було обраховано частотну залежність магнітної сприйнятливості (K_{fd}) за формулою:

$$K_{fd}(\%) = (\chi_{LF} - \chi_{HF}) / \chi_{LF} * 100\%. \quad (1)$$

На зразках з екстремально високими значеннями χ_{LF} вимірювання зроблені на капамістку KLY-2 (Geofizyka, Чехія).

Для визначення концентрацій хімічних елементів у пробах ґрунтів використано атомно-абсорбційний аналіз, який виконано в лабораторії Центральної геофізичної обсерваторії спектрофотометром «Селма».

Результати дослідження. В ході лабораторних досліджень зразків ґрунтів було визначено основні статистичні характеристики розподілів магнітних властивостей та вмістів ВМ у ґрунтах м. Запоріжжя, що наведені в табл. 1.

Низькочастотна магнітна сприйнятливість (χ_{LF}) ґрунтів міста змінюється у межах від 61×10^{-8} до $4087 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ при медіані $271 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ (табл. 1). Як фонове значення для чорноземів звичайних доцільно взяти $\chi_{LF} \sim 80 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, встановлене для ґрунтів заповідника "Хомутовський степ" (Донецька обл.) у роботі [9].

Просторовий розподіл χ_{LF} ґрунтів наведений на рис. 1. Значення, близькі до фонових, спостерігаються у правобережній частині міста за винятком промислової зони в Ленінському районі міста між вул. Кияшка та Каширським шосе, де χ_{LF} сягає $233 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Аномалії надвисоких значень $\chi_{LF} > 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ приурочені до промислової зони в Заводському районі міста, де розташовані основні металургійні підприємства. З рис. 1 видно, що χ_{LF} ґрунтів швидко зменшується по мірі віддалення від цієї промзони.

Таблиця 1

Статистичні характеристики магнітних властивостей та вмісту важких металів у ґрунтах м. Запоріжжя

	Мінімум	Максимум	Середнє	Медіана	Стандартне відхилення	Дисперсія	Асиметрія	Екссес	Коефіцієнт варіації
pH	6,5	7,9	7,3	7,3	0,2	0,1	0,0	2,5	3,1
Cd [мг/кг]	0,0	2,0	0,7	0,8	0,4	0,2	0,7	0,0	62,4
Mn [мг/кг]	179,0	42066,0	3421,5	773,0	6686,6	44711148,6	4,1	19,9	195,4
Cu [мг/кг]	8,0	186,0	29,0	23,5	25,4	646,2	4,3	24,6	87,6
Ni [мг/кг]	13,0	479,0	41,5	31,5	60,1	3611,1	6,8	49,6	144,9
Pb [мг/кг]	6,0	91,0	23,9	22,0	15,5	239,5	1,8	5,0	64,9
Zn [мг/кг]	30,0	361,0	126,0	115,5	66,5	4415,9	1,0	2,0	52,7
χ_{LF} [10^{-8} м ³ /кг]	60,6	4086,5	680,0	271,2	910,9	829702,2	2,0	3,6	134,0
K_{fd} [%]	0,0	13,3	3,0	2,0	3,5	12,1	1,3	72,5	114,2

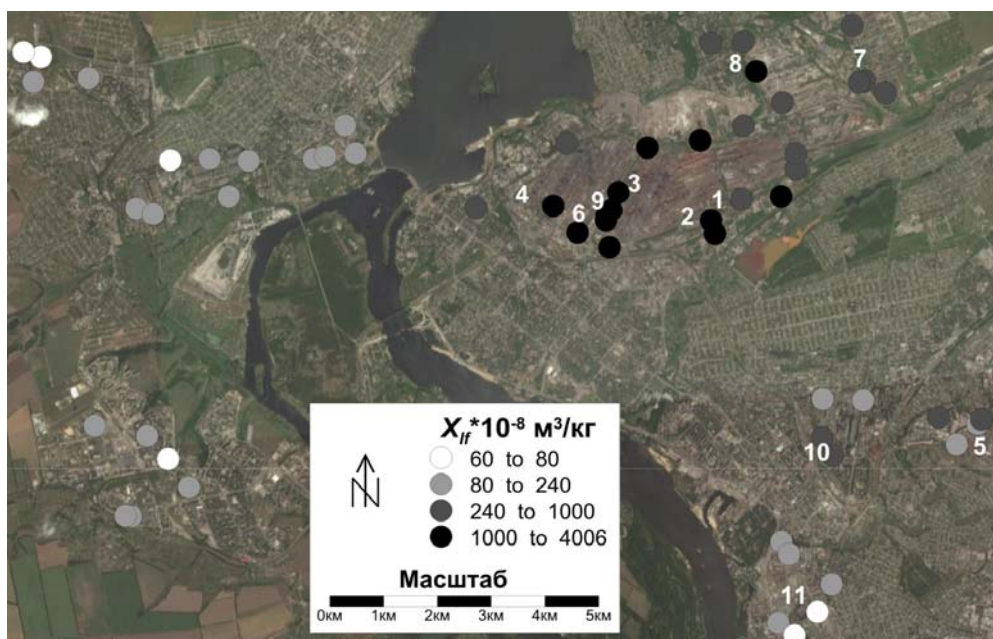


Рис. 1. Карта-схема низькочастотної магнітної сприйнятливості ґрунтів Запоріжжя:

- 1 – ВАТ "Запоріжсталь", 2 – ПАТ "Дніпроспецсталь", 3 – ПАТ "Запорізький завод феросплавів", 4 – ПАТ "Український графіт", 5 – ПАТ "Запорізький абразивний комбінат", 6 – ПАТ "Запоріжжкокс", 7 – ТОВ "Запорізький титано-магнієвий комбінат", 8 – ПАТ "Запоріжвогнетрив", 9 – ВАТ "Запорізький завод зварювальних флюсів та скловиробів", 10 – ПАТ "Мотор Січ", 11 – ПАТ "Запорізький автомобілебудівний завод"

Частотна залежність магнітної сприйнятливості (K_{fd}) чутлива до вмісту дрібнодисперсних суперпарамагнітних часток (розмір <30 нм) [3]. Згідно з [5, 10], якщо магнетизм ґрунту визначається переважно дрібними зернами у доменному стані на межі суперпарамагнетизм-однодоменність, для зразків характерні значення K_{fd} >6%, тоді як при переважанні багатодомених зерен K_{fd} демонструє низькі значення. У чистих ґрунтах Лісостепу і Степу України K_{fd} складає 8...13% [8], у техногенно забруднених аналогах K_{fd} зазвичай <5% [9].

K_{fd} ґрунтів Запоріжжя становить 0-13,3% при медіанному значенні 2,0%. Просторовий розподіл K_{fd} показує, що високі значення, притаманні ґрунтам у природному стані, спостерігаються на правобережній західній околиці міста, а низькі значення K_{fd} <2% приурочені до основної промислової зони в Заводському районі, що свідчить про переважання в цих ґрунтах техногенних багатодомених зерен у складі магнітної фракції.

Актуальна кислотність ґрунту характеризується величиною водневого показника pH_(водн.). За значеннями pH водної витяжки ґрунти Запоріжжя відносяться до нейтральних і слаболужних [20]. pH_(водн.) по-

верхнього шару ґрунтів коливається в межах 6,5-7,9 (табл. 1). Найвищі показники зафіксовано на території промзони у Заводському районі міста.

Вміст ВМ. Згідно з нормативами оцінок забруднення ґрунтів ВМ [21], благополучною можна вважати екологічну ситуацію, коли вміст елементів відносно регіонального фону валової форми у ґрунтах становить 1-2; задовільною – 2-4; передкризовою 4-5; кризовою 5-6; катастрофічною >6.

Вміст кадмію. Як регіональний фон кадмію використане значення 0,22 мг/кг, отримане [15] у чорноземі звичайних Дніпропетровської обл. Середній вміст Cd у ґрунтах Запоріжжя становить 0,72 мг/кг, що відповідає задовільному рівню забруднення. В основній промисловій зоні на території комбінату "Запоріжсталь" і "Дніпроспецсталь", коксохімічного заводу та заводу феросплавів у 9-ти пунктах, також у 4-х пунктах поблизу заводу "Мотор Січ" та у 2-х на Запорізькому автомобілебудівному заводі, спостерігаються кризовий та катастрофічний рівні забруднення. На правому березі кризовий рівень зафіксований по Дніпропетровському шосе, біля прохідної ВАТ "Запоріжтрансформатор". На території заводу "Мотор Січ" зафіксований найвищий рівень забруднення кадмієм, валові форми перевищували фонову концентрацію в 7,95 рази.

Вміст марганцю. Середній вміст марганцю у ґрунтах за Віноградовим оцінюється у 850 мг/кг [28]. Медіанний валовий вміст марганцю у ґрунтах Запоріжжя становить 773 мг/кг, а максимальне значення 42066 мг/кг, що майже на два порядки перевищує фонове (475 мг/кг за [28]). Вся територія основної промислової зони на лівому березі Дніпра відповідає кризовому екологічному стану за вмістом Mn.

Вміст міді. Регіональний фон міді у ґрунтах – 21 мг/кг [28]. Проте в результаті надходження міді внаслідок діяльності підприємств чорної металургії і здатності поверхневого шару ґрунту до акумуляції міді, вміст її у ґрунтах міста збільшився.

Медіана валового вмісту міді у ґрунтах Запоріжжя (інтервал 0-5 см) становить 23,5 мг/кг, що відповідає фону. Підвищений вміст міді відмічається на території основної промислової зони, а також поблизу заводу "Мотор Січ". На території Запорізького автомобілебудівного заводу відмічається максимальне значення 186 мг/кг, що перевищує фонову величину в 9 разів.

Вміст нікелю. Регіональний фон нікелю у ґрунтах – 28 мг/кг [28]. Вміст Ni у цілому відповідає благополучному, лише в околі заводу "Мотор Січ" відмічаються підвищені рівні, що сягають 479 мг/кг, це в 17 разів перевищує фон.

Вміст свинцю перевищує фоновий рівень (10 мг/кг) на всій лівобережній території міста, а також у промзонах на правому березі. Медіанне значення 22 мг/кг. Критичних значень досягає в окремих точках на території Запорізького титано-магнієвого комбінату, Запорізького автомобілебудівного заводу та коксохімічного заводу.

Вміст цинку. Кларк цинку в земній корі 76 мг/кг [16]. Кларк цинку в ґрунтах за Боуеном 90 мг/кг [1]. Середній валовий вміст цинку у ґрунтах Запоріжжя становить 116 мг/кг, що у два рази перевищує фоновий рівень (57 мг/кг) [28]. В одному пункті в Осипенківському житломасиві на правому березі вміст цинку сягає кризового рівня. У промислових зонах міста хоча й відбувається накопичення цинку у поверхневих

горизонтах ґрунтів, проте його вміст відповідає задовільному екологічному рівню.

Обговорення результатів. Значне підвищення магнітної сприйнятливості ґрунтів у місті вказує на збільшення концентрації магнітних мінералів, джерелом яких є техногенні дрібнодисперсні аерозолі [4]. Техногенні магнітні мінерали поступово руйнуються під впливом ґрунтових розчинів, вивільнюючи BM, що має впливати на статистичні закономірності.

Статистична обробка масивів значень χ_{LF} , K_{fd} та вмісту BM (табл. 1) показала, що найбільші коефіцієнти варіації спостерігаються для χ_{LF} , K_{fd} , а також вмісту Mn та Ni. Вміст інших досліджених елементів помірно варіабельний, коефіцієнти варіації становлять 52,7-87,6. Зазначимо, що висока варіабельність вмісту BM притаманна зонам техногенних аномалій за відповідними елементами [24].

Найбільші асиметрії розподілів характерні для χ_{LF} , а також для Ni, Cu, Mn, Pb, тобто у вказаних розподілах переважають високі значення. Решта розподілів є майже симетричними.

Важливим етапом дослідження стало вивчення кореляційних зв'язків у середині матриці, що складається з χ_{LF} , K_{fd} та вмісту BM (табл. 2). Наявність зв'язку може вважатися доведеною, якщо коефіцієнт кореляції Пірсона (r) між двома масивами даних перевищує критичну величину для обраного рівня значущості p і відомих розмірів вибірки [2]. Вибірki даних містять по 60 пар значень, отже при $p < 0,01$ критичне значення r становить 0,336. Критичне значення перевищують коефіцієнти кореляції між χ_{LF} та Cd ($r=0,388$), Pb ($r=0,536$), Ni ($r=0,590$), Cu ($r=0,648$), Mn ($r=0,698$), отже можна стверджувати, що збільшення магнітної сприйнятливості ґрунтів супроводжується підвищенням вмістів перелічених металів. Також спостерігається значуща негативна кореляція між K_{fd} та вмістом чотирьох BM, що підсилюється в ряду Mn-Cu-Pb-Zn.

Таблиця 2

Коефіцієнти кореляції								
	χ_{LF}	K_{fd}	pH	Cd	Mn	Cu	Ni	Pb
K_{fd} [%]	-0,355							
pH	0,386	-0,409						
Cd [мг/кг]	0,388	-0,254	0,300					
Mn [мг/кг]	0,698	-0,367	0,461	0,182				
Cu [мг/кг]	0,648	-0,472	0,490	0,487	0,446			
Ni [мг/кг]	0,590	-0,139	0,209	0,300	0,293	0,563		
Pb [мг/кг]	0,536	-0,504	0,485	0,366	0,351	0,562	0,224	
Zn [мг/кг]	0,296	-0,541	0,409	0,376	0,231	0,361	0,136	0,525

Рівень значущості зв'язку 99% ($p < 0,01$)

Означені закономірності вказують на достовірний зв'язок між магнітними властивостями ґрунтів у Запоріжжі та їх забрудненням BM.

Елементи Mn, Cu, Ni, Pb, Cd, Zn використано для розрахунку індексу накопичення забруднення PLI (*Pollution load index*) [11]. Цей показник розраховується як середнє геометричне коефіцієнтів концентрації n металів (K_c , $i=1...n$), де K_c i -го металу представляє собою відношення вмісту металу в зразку до фонового вмісту:

$$PLI = \sqrt[n]{K_c(Mn) \cdot K_c(Cu) \cdot K_c(Ni) \cdot K_c(Pb) \cdot K_c(Cd) \cdot K_c(Zn)}. \quad (2)$$

Показник накопичення забруднення PLI демонструє, у скільки разів концентрація поллютантів у ґрунті перевищує фонову. Значення $PLI > 1$ показує, що ґрунти забруднені, про відсутність забруднення свідчить $PLI < 1$ [12].

На рис. 2 наведено карту-схему PLI ґрунтів Запоріжжя. У результаті виконаних екогеохімічних досліджень встановлено, що для ґрунтів Запоріжжя PLI може досягати 5,3. Як бачимо, комплексні геохімічні аномалії з найбільшим значенням цього показника просторово тяжіють до головної промислової зони міста, розташованої у Заводському районі. Ареали розсіювання BM знаходяться не лише в санітарно-захисних зонах підприємств чорної металургії, але й навколо інших підприємств. Наприклад, поблизу заводу "Мотор Січ" $PLI = 3,8$. За показником PLI, найбільш чистою є правобережна частина міста ($PLI = 0-2$). Беручи до уваги розподіл Запоріжжя, в якій переважають північно-східні напрямки, ареали аерозольного забруднення мали бути витягнуті на південний захід. Цього не відбувається

завдяки наявності потужного екологічного бар'єру – р. Дніпро, над руслом якого проявляється так званий "долинний" ефект. Вітер, що дме під гострим кутом до долини річки, над водою змінює свій напрямок, рухаю-

чись уздовж русла. Можна зробити висновок, що Дніпро перешкоджає забрудненню правобережних районів міста викидами підприємств металургійного комплексу.

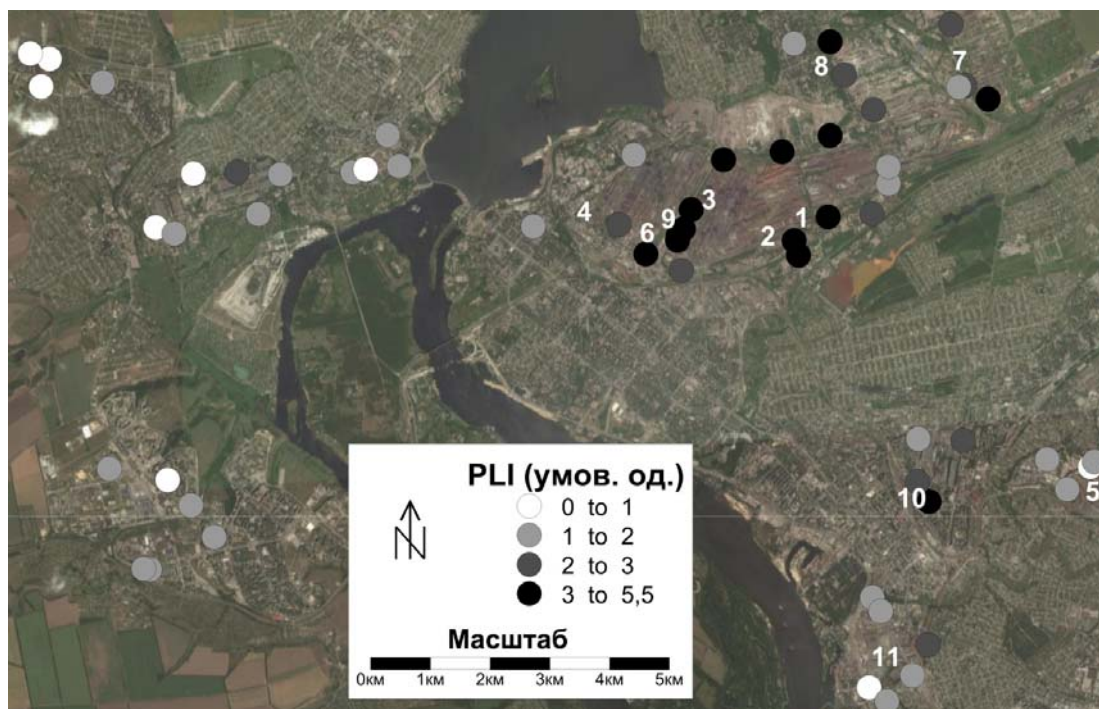


Рис. 2. Карта-схема показника накопичення забруднення PLI ґрунтів м. Запоріжжя:

- 1 – БАТ "Запоріжсталь", 2 – ПАТ "Дніпроспецсталь", 3 – ПАТ "Запорізький завод феросплавів", 4 – ПАТ "Український графіт", 5 – ПАТ "Запорізький абразивний комбінат", 6 – ПАТ "Запоріжжкокс", 7 – ТОВ "Запорізький титано-магнієвий комбінат", 8 – ПАТ "Запоріжвогнетрив", 9 – БАТ "Запорізький завод зварювальних флюсів та скловиробів", 10 – ПАТ "Мотор Січ", 11 – ПАТ "Запорізький автомобілебудівний завод"

Між χ_{LF} та PLI також існує сильний статистично доведений зв'язок, коефіцієнт кореляції між ними становить $r=0,79$ при рівні значущості $p<0,01$, також спостерігається негативна кореляція між K_{fd} та PLI з коефіцієнтом $r=-0,49$ при рівні значущості $p<0,01$. Це означає, що магнітне забруднення, в якому переважає багатодомenna фракція, накопичується в ґрунтах разом з ВМ.

Актуальна кислотність ($pH_{(водн.)}$) ґрунтів Запоріжжя демонструє середній кореляційний зв'язок з PLI ($r=0,59$), а також помірний ($r=0,39$, при $p<0,01$) кореляційний зв'язок з χ_{LF} . Тобто, нагромадження техногенного магнітного та поліелементного забруднення супроводжується олушенням ґрунтів. Імовірно пояснення цього явища лежить у площині хімічних реакцій між техногенними речовинами викидів металургійних заводів в атмосфері і ґрунті. Підприємства Запоріжжя викидають великі обсяги оксидів азоту і діоксиду сірки. В атмосфері ці речовини реагують з водою з утворенням відповідних кислот. Викиди неорганічного пилу, що містить магнітні мінерали та ВМ, на 5-50% складаються з CaO , який інтенсивно реагує з водою, а також азотними та сірчаними аерозолями, з утворенням лугів і солей. Означені хімічні реакції можуть проходити як в атмосфері, провокуючи слаболужні опади, так і в ґрунті, під впливом кислотних опадів [18].

Висновки. Підприємства металургійного комплексу визначають рівень забруднення ґрунтів Запоріжжя магнітною фракцією. На прилеглих територіях у Заводському районі міста встановлено значне підвищення магнітної сприйнятливості, χ_{LF} ґрунтів досягає $4087 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ і зменшується по мірі віддалення від цієї промзо-

ни. Тут зафіксовано комплексну геохімічну аномалію за вмістами Cd , Mn , Pb , які відповідають кризовому та катастрофічному рівням, показник накопичення забруднення PLI становить 2,6-5,3.

ґрунти правобережної частини міста характеризуються близькими до фонових або помірно підвищеними χ_{LF} з показником PLI, близьким до 1, ареали розсіяння деяких хімічних елементів приурочені до окремих промислових об'єктів. Просторові розподіли хімічних елементів і магнітних характеристик показують, що Дніпро становить екологічний бар'єр на шляху розповсюдження забруднення, захищаючи правобережну частину міста.

Магнітні параметри є важливими індикаторами накопичення забруднення в ґрунтах Запоріжжя. демонструє значущі додатні коефіцієнти кореляції з вмістом Cd , Pb , Ni , Cu , Mn , а також показником PLI, а K_{fd} знаходиться в оберненому кореляційному зв'язку з Mn , Cu , Pb та Zn . Тобто техногенні магнітні мінерали накопичуються в ґрунті разом з ВМ.

Встановлено, що нагромадження техногенного магнітного та поліелементного забруднення супроводжується олушенням ґрунтів.

Наведені закономірності є вагомим обґрунтуванням для застосування магнітного методу діагностики та моніторингу екологічного стану ґрунтів Запоріжжя та прилеглих територій.

Подяки. Автори вдячні колективу Центральної геофізичної обсерваторії ДСНС і особисто зав. лабораторії спостережень за забрудненням ґрунтів і моніторингу Дівніч Тетяні Федорівні за сприяння у проведенні досліджень.

Список використаних джерел

1. Bowen H. J. M. *Environmental chemistry of elements* / H. J. M. Bowen. N.Y.: Acad. Press, 1989. – 333 p.
2. Chaddock R. E. *Principles and Methods of Statistics* / R. E. Chaddock ; 1st Edition // Houghton Mifflin Company. – Cambridge: The Riverside Press, 1925.
3. Dearing J. A. *Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 System* / J. A. Dearing. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. – P. 54.
4. Evans M. E. *Environmental magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics* / M. E. Evans, F. Heller // International Geophysics series. – Elsevier science (USA), 2003. – Vol. 86. – 299 p.
5. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials / J. A. Dearing, R. J. L. Dann, K. Hay et al. // *Geophys. J.* – 1996. – Int. 124. – P. 228-240.
6. Heller F. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland / F. Heller, Z. Strzyszc, T. Magiera // *Journal of geophysical research*. – 1998. – Vol. 103, № B8. – P. 17,767-17,774.
7. Magiera T. Mapping particulate pollution loads using soil magnetometry in urban forests in the Upper Silesia Industrial Region, Poland / T. Magiera, Z. Strzyszc, M. Rachwal // *Forest ecology and management*. – 2007. – Vol. 248. – P. 36-42.
8. Magnetic iron oxides occurring in chernozem soil from Ukraine and Poland as indicators of pedogenic processes / M. Jeleńska, A. Hasso-Agopsowicz, M. Kądziałko-Hofmokr et al. // *Stud. Geophys. Geod.* – 2008. – № 52. – P. 255-270.
9. Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine / M. Jeleńska, A. Hasso-Agopsowicz, B. Kopcewicz et al. // *Geophysical Journal International*. – 2004. – Vol. 159(1). – P. 104-116.
10. Secondary ferrimagnetic minerals in Welsh soils: a comparison of mineral magnetic detection methods and implications for mineral formation / J. A. Dearing, P. M. Bird, R. J. L. Dann, S. F. Benjamin // *Geophys. J.* – 1997. – Int. 130. – P. 727-736.
11. Strzyszc Z. The influence of industrial immissions on the magnetic susceptibility of soils in upper Silesia / Zygmunt Strzyszc, Tadeusz Magiera, Friedrich Heller // *Studia Geophysica et Geodaetica*. – 1996. – Vol. 40, Issue 3. – P. 276-286.
12. Tomlinson D. L. Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index / D. L. Tomlinson, J. G. Wilson, C. R. Harris, D. W. Jeffney // *Helgol. Wiss. Meeresunters.* – 1980. – Vol. 33. – P. 566-572.
13. Васильев А. А. Тяжелые металлы в почвах города Чусового: оценка и диагностика загрязнения / А. А. Васильев, А. Н. Чашин. – Пермь: ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2011.
14. Віршило І. В. Просторовий аналіз індустріального забруднення ґрунтів Північної Астурії (Іспанія) за даними петромагнітних і геохімічних досліджень / І. В. Віршило, К. М. Бондар // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – 2009. – Вип. 6. – С. 223-234.
15. Григоренко, Л. В. Еколого-гігієнічна оцінка забруднення ґрунту кадмієм та свинцем в умовах техногенного навантаження на довкілля (на прикладі Дніпропетровської області): автореф. дис. ... канд. мед. наук: 14.02.01 / Григоренко Любов Вікторівна; ДУ "Інститут гігієни та медичної екології ім. О. М. Марзеева АМН України" - К., 2010. – 23 с.
16. Гринвуд Н. Химия элементов / Н. Гринвуд, А. Эрншо. – М.: Бинном, 2008. – Т. 1. – 607 с.; Т. 2 – 670 с.
17. Донець І. А. Суспільно-географічне дослідження екологічних проблем м. Запоріжжя : 11.00.02 автореф. ... канд. географ. наук / Донець Ірина Анатоліївна. – Київ, 2001. – 28 с.
18. Екологічний паспорт Запорізької області 2014 р. [Електронний ресурс] – Режим доступу : <http://www.menr.gov.ua/protection/protection1/zaporizka>.
19. Кислотные дожди / Ю. А. Израэль, И. М. Назаров, А. Я. Прессин и др. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 206 с.
20. Кормилицына О. В. Почвоведение / О. В. Кормилицына, О. В. Мартыненко, В. Н. Карминов, Е. Д. Сабо ; [под ред. Рожкова В. А.]. – Москва, 2006. – 306 с.
21. Коробкин В. И. Экология / В. И. Коробкин, Л. В. Передельский. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. – 576 с.
22. Національний атлас України. ґрунти та ґрунтові ресурси. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://wdc.org.ua/atlas/4100200.html>.
23. Некос В. Ю. Нормування антропогенного навантаження на навколишнє середовище : навч. посібн. / В. Ю. Некос, Н. В. Максименко, О. Г. Владимірова. — Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2005. — 184 с.
24. Саєт Ю. Е. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саєт [и др.]. – М.: Недра, 1990. – 325 с.
25. Скибарко А. П. Мониторинг техногенного загрязнения земель промышленно-урбанизированных территорий : автореф. ... канд. геогр. н. : 25.00.26 / Скибарко Алексей Петрович. – Москва, 2013. – 144 с.
26. Стан довкілля в Запорізькій області. Інформаційно-аналітичний огляд. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zdn.gov.ua/view/2015-rik.html>.
27. Страдина О. А. Магнитная восприимчивость почв Среднего Предуралья как показатель их загрязнения тяжелыми металлами: автореф. дис. ... канд. с.-х. н. / Страдина О. А. – Уфа, 2008. – 20 с.
28. Фононий вміст мікроелементів у ґрунтах України / [під ред. А. І. Фатєєва, Я. В. Пащенко]. – 2003. – 72 с.

References

1. Bowen, H.J.M. (1989). *Environmental chemistry of elements*. Acad. Press, 333 p.
2. Chaddock, R.E. (1925). *Principles and Methods of Statistics*. (1st Edition). Houghton Mifflin Company, The Riverside Press, Cambridge.
3. Dearing, J.A. (1999). *Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 System*. Chi Publishing, Kenilworth, 54 p.
4. Evans, M.E., Heller, F. (2003). *Environmental magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics*. Elsevier science (USA), *International Geophysics series*, 86, 299.
5. Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J. et al. (1996). Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophys. J. Int.*, 124, 228-240.
6. Heller, F., Strzyszc, Z., Magiera, T. (1998). Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland. *Journal of geophysical research*, 103, B8, 17,767-17,774.
7. Magiera, T., Strzyszc, Z., Rachwal, M. (2007). Mapping particulate pollution loads using soil magnetometry in urban forests in the Upper Silesia Industrial Region, Poland. *Forest ecology and management*, 248, 36-42.
8. Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokr, M., Kopcewicz, B., Sukhorada, A. et al. (2008). Magnetic structure of polluted soil profiles from Eastern Ukraine. *Acta Geophysica*, 49, 1012-1033.
9. Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Tyamina, K. et al. (2004). Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophys. J. Int.*, 159(1), 104-116.
10. Dearing, J.A., Bird, P.M., Dann, R.J.L., Benjamin, S.F. (1997). Secondary ferrimagnetic minerals in Welsh soils: a comparison of mineral magnetic detection methods and implications for mineral formation. *Geophys. J. Int.*, 130, 727-736.
11. Strzyszc, Z., Magiera, T., Heller, F. (1996). The influence of industrial immissions on the magnetic susceptibility of soils in upper Silesia. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 40(3), 276-286.
12. Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., Jeffney, D.W. (1980). Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgol. Wiss. Meeresunters.*, 33, 566-572.
13. Vasilyev, A., Chaschin, A. (2011). *Heavy metals in the soils of the city Chusovoy: assessment and diagnosis of pollution*. Perm. [in Russian].
14. Virshylo, I.V., Bondar, K. (2009). Spatial analysis of industrial soil contamination North Asturias (Spain) according to petromagnetic and geochemical studies. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*, 6, 223-234. [in Ukrainian].
15. Grygorenko, L. (2010). Ecological and hygienic assessment of soil contamination by lead and cadmium in terms of environmental impact (for example, Dnipropetrovsk region). *Extended abstract of candidate's thesis (14.02.01, Medicine)*. Institute of Hygiene and Medical Ecology, 23 p. [in Ukrainian].
16. Greenwood, N., Earnshaw, A. (2008). *Chemical elements*. (Vols. 1-2). Moscow: Binom. [in Russian].
17. Donets, I. (2001). Socio-geographical study of environmental problems on Zaporizhzhya. *Extended abstract of candidate's thesis (11.00.02, Geography)*. Kyiv, 28 p. [in Ukrainian].
18. Ecological passport Zaporizhzhya region in 2014. (n.d.). *menr.gov.ua*. Retrieved from <http://www.menr.gov.ua/protection/protection1/zaporizka>. [in Ukrainian].
19. Israel, Yu., Nazarov, I., Pression, A. (1983). *Acid rain*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 206 p. [in Russian].
20. Kormylytsyna, O.V., Martynenko, A.V., Karmynov, V.N., Sabo, E. (2006). *Pochvovedenye*. V.A. Rozhkov (ed.). Moscow, 306 p. [in Russian].
21. Korobkin, V., Peredelsky, L. (2003). *Ecology*. Rostov-on-Don: Phoenix, 576 p. [in Russian].
22. The National Atlas of Ukraine. Soil and groundwater resources. (n.d.). *wdc.org.ua*. Retrieved from <http://wdc.org.ua/atlas/4100200.html>. [in Ukrainian].
23. Nekos, V., Maksimenko, N., Vladimirov, O. (2005). *Rationing anthropogenic load on the environment: teach. guidances*. Kharkiv: Karazin Kharkiv National University, 184 p. [in Ukrainian].
24. Saet, Yu.E. et al. (1990). *Environmental Geochemistry*. Moscow: Nedra, 325 p. [in Russian].
25. Skybarko, A.P. (2013). Monitoring of technogenic pollution of land industrial territories. *Extended abstract of candidate's thesis (25.00.26, Geography)*. Moscow, 144 p. [in Russian].
26. The environmental situation in Zaporizhzhya region. Information-analytical review. (n.d.). *zdn.gov.ua*. Retrieved from <http://zdn.gov.ua/view/2015-rik.html>. [in Ukrainian].
27. Stradina, O. (2008). The magnetic susceptibility of soils of the Middle Urals as an indicator of contamination with heavy metals. *Extended abstract of candidate's thesis (Agriculture)*. Ufa, 20 p. [in Russian].
28. Fateeva, A., Pashchenko, Ya. (Eds.). (2003). *Background contents of trace elements in soils Ukraine*. 72 p. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 19.12.15

K. Bondar, Cand. Sci. (Geol.), Senior Researcher

E-mail: ks_bondar@ukr.net

I. Tsyupa, Engineer

Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine

A. Korol, Chemist

Central Geophysical Observatory

39-B Nauky Ave., Kyiv, 03028 Ukraine

MAGNETIC METHOD OF ZAPORIZHZHYA SOIL POLLUTION ASSESSMENT: ECOLOGICAL AND GEOCHEMISTRY JUSTIFICATION

The paper is devoted to the study of the magnetic properties and content of heavy metals in soils from Zaporizhzhya area – a powerful industrial center. During the study it was found that low-frequency magnetic susceptibility (χ_{LF}) of soils varies within the range $61 \dots 4087 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ with a median value $271 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, and the frequency dependence of magnetic susceptibility (K_{fd}) is $0 \dots 13.3\%$ with a median value 2.0% . The low χ_{LF} and high K_{fd} values, that are typical of natural soils, are observed on the right-bank of the western outskirts of the city, and low values $K_{fd} < 2\%$ and $\chi_{LF} > 10^{-5} \text{ m}^3/\text{kg}$ are confined to the main industrial zone where steel-mills are situated. Observed correlations between magnetic parameters and heavy metals content in soils allow us to recommend magnetic method for evaluation and monitoring of ecological conditions in of the Zaporizhzhya city.

Maps that indicate spatial distribution of χ_{LF} and Pollution Load Index (PLI) of soils have shown that the river Dnieper prevents spreading of dust and gas pollution on the right bank of the city.

Keywords: low-frequency magnetic susceptibility of soils, heavy metals, pollution load index, Zaporizhzhya.

К. Бондарь, канд. геол. наук, ст. науч. сотрудник,

E-mail: ks_bondar@ukr.net,

И. Цюпа, инж. 1 кат.,

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина,

А. Король, вед. химик,

Центральная геофизическая обсерватория,

пр. Науки, 39, корп. 2, м. Киев, 03028, Украина

МАГНИТНЫЙ МЕТОД ПРИ ОЦЕНКЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЗАПОРОЖЬЯ: ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Работа посвящена изучению магнитных свойств и содержанию тяжелых металлов в почвах г. Запорожья – мощного промышленного центра. В ходе исследования установлено, что низкочастотная магнитная восприимчивость (χ_{LF}) почвы города изменяется в диапазоне от 61×10^{-8} до $4087 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ при медианном значении $271 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, а частотная зависимость магнитной восприимчивости (K_{fd}) почвы Запорожья составляет $0 \dots 13,3\%$ при медиане $2,0\%$. Низкие значения χ_{LF} и высокие K_{fd} характерны для природных почв, встречаются на правобережной западной окраине города, а низкие значения $K_{fd} < 2\%$ при $\chi_{LF} > 10^{-5} \text{ м}^3/\text{кг}$ приурочены к основной промышленной зоне, где сконцентрированы заводы металлургического комплекса. Определенные корреляционные связи между магнитными параметрами и содержанием тяжелых металлов в почвах дают возможность рекомендовать магнитный метод для диагностики и мониторинга экологического состояния почвы г. Запорожье.

Построенные карты-схемы пространственных распределений χ_{LF} и показателя накопления загрязнения (PLI) показывают, что р. Днепр препятствует распространению пылегазового загрязнения в правобережной части города.

Ключевые слова: низкочастотная магнитная восприимчивость почвы, тяжелые металлы, показатель накопления загрязнения, Запорожье.