

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Група ГЗЗм-24-1

Наталія Гайдим

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва "ІФНТУНГ-ДОННАБА"
Кафедра геодезії та землеустрою

ГАЙДИМ НАТАЛІЯ ВАСИЛІВНА

УДК 332.3

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

«Геоінформаційний аналіз просторового розподілу важких металів у ґрунтах
міста Києва»

(назва роботи)

Землеустрій та кадастр

(назва освітньої програми)

193 – Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

Н.В. Гайдим

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник:

Приходько Микола Миколайович, д. геогр. н., проф.

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2025

АНОТАЦІЯ

Геоінформаційний аналіз просторового розподілу важких металів у ґрунтах міста Києва. – Рукопис.

Магістерська робота за спеціальністю 193 «Геодезія та землеустрій». – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2025.

Магістерська робота присвячена дослідженню просторового розподілу важких металів у ґрунтах міста Києва з використанням сучасних методів математичної статистики та геоінформаційних технологій. У контексті зростання техногенного навантаження на урбанізовані території особливої актуальності набуває аналіз накопичення токсичних елементів, які здатні суттєво впливати на стан екосистем і здоров'я населення. Метою роботи є комплексна оцінка вмісту важких металів (Pb, Cu, Zn, As, Cr), визначення просторових закономірностей їхнього поширення та ідентифікація зон підвищеного екологічного ризику.

У межах дослідження створено ГІС-базу даних проб ґрунту та джерел техногенного впливу, проведено статистичну обробку лабораторних вимірювань і виконано моделювання просторового розподілу з використанням методів інтерполяції IDW та Ordinary Kriging. Отримані результати дали змогу виявити нерівномірність техногенного навантаження, встановити території з надмірним накопиченням важких металів та простежити їхній зв'язок із транспортною та промисловою інфраструктурою.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні геоінформаційного аналізу, статистичного моделювання та просторової візуалізації для комплексного вивчення міських ґрунтів.

Ключові слова: важкі метали, ґрунти Києва, ГІС, ArcGIS, Kriging, IDW, техногенне забруднення, екологічний ризик, просторовий аналіз.

ANNOTATION

Geoinformation analysis of the spatial distribution of heavy metals in the soils of Kyiv. – Manuscript.

Master's degree in specialty 193 "Geodesy and land management". - Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas. - Ivano-Frankivsk, 2025. The Master's thesis investigates the spatial distribution of heavy metals in the soils of Kyiv using modern methods of mathematical statistics and geoinformation technologies. Considering the increasing anthropogenic pressure on urban environments, the assessment of toxic metal accumulation has become crucial for understanding ecological stability and potential threats to public health. The aim of the study is to perform a comprehensive evaluation of heavy metal concentrations (Pb, Cu, Zn, As, Cr), identify spatial patterns of their distribution, and determine zones of elevated ecological risk.

A GIS database integrating soil sampling results and major pollution sources was developed. Statistical processing of laboratory measurements and spatial modelling using IDW and Ordinary Kriging interpolation methods enabled the visualization of pollution gradients and the identification of hotspots associated with transportation corridors and industrial infrastructure.

The scientific novelty of the research lies in the integrated application of GIS-based analysis, spatial statistics, and cartographic visualization to study urban soil contamination.

Keywords: heavy metals, Kyiv soils, GIS, ArcGIS, Kriging, IDW, anthropogenic pollution, ecological risk, spatial analysis.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	9
1.1 Поняття і класифікація важких металів як забруднювачів довкілля.....	9
1.2 Джерела надходження важких металів у ґрунти урбанізованих територій	15
1.3 Екологічні наслідки накопичення важких металів у ґрунтах.....	17
1.4 Використання ГІС-технологій у дослідженнях ґрунтового покриву.....	20
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ АНАЛІЗУ.	23
2.1. Характеристика вихідних даних.....	23
2.2. Нормативна база оцінки забруднення ґрунтів.....	24
2.3. Методи математичної статистики для оцінки вмісту важких металів.....	26
2.4. Використання ГІС для просторового аналізу.....	33
РОЗДІЛ 3. ПРИРОДНІ ТА АНТРОПОГЕННІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ МІСТА КИЄВА.....	38
3.1. Фізико-географічна характеристика міста Києва.....	38
3.2. Ґрунтовий покрив території дослідження.....	40
3.3. Джерела та сучасний стан забруднення ґрунтів важкими металами у Києві	42
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ, ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	45
4.1. Просторовий розподіл важких металів та ідентифікація зон підвищеного екологічного ризику.....	45
4.2. Аналіз поширення важких металів, порівняння з гранично допустимими концентраціями та екологічна оцінка стану ґрунтів міста.....	50
4.3. Рекомендації щодо мінімізації забруднення та рекультивації ґрунтів.....	52
ВИСНОВКИ.....	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

ВСТУП

Важливим чинником антропогенного впливу на довкілля є забруднення ґрунтів важкими металами. Їхні джерела - промислові та комунальні підприємства, автотранспорт і сільське господарство - спричиняють накопичення токсичних речовин, що змінюють структуру й функціонування природних екосистем та становлять загрозу для здоров'я людини.

У міських агломераціях, зокрема у Києві, інтенсивний розвиток промисловості та транспорту посилює техногенний тиск на природні компоненти. Це призводить до деградації ґрунтів, зміни їхніх геохімічних властивостей і накопичення забруднювачів, які не розкладаються, а переходять у нові форми, поглиблюючи екологічні проблеми.

Застосування геоінформаційних технологій дає змогу просторово аналізувати поширення важких металів у ґрунтах, що забезпечує більш точну оцінку екологічного стану території. Такий підхід дозволяє виявити найбільш уражені зони, сприяти плануванню природоохоронних заходів і забезпеченню екологічної безпеки міського середовища.

Актуальність дослідження полягає у тому, що важкі метали не розкладаються у природному середовищі, а накопичуються у ґрунтах, негативно впливаючи на продуктивність сільськогосподарських земель та якість життя людей. Особливо гостро ця проблема стоїть у мегаполісах, де техногенне навантаження значно перевищує здатність природних систем до саморегуляції. Саме тому моніторинг і просторовий аналіз забруднення ґрунтів є необхідними умовами для забезпечення ефективного екологічного управління.

Мета дослідження провести комплексну оцінку просторового розподілу важких металів у ґрунтах м. Києва з використанням методів математичної статистики та ГІС-технологій. Виявити зони підвищеного екологічного ризику,

оцінити вплив джерел забруднення та розробити практичні рекомендації для зменшення негативного антропогенного навантаження.

Для вирішення цієї мети сформульовані такі **завдання**:

- проаналізувати наукову літературу з проблеми забруднення міських ґрунтів важкими металами;
- провести моніторинг стану ґрунтів м. Києва та визначити джерела надходження забруднювачів;
- виконати статистичну обробку даних та розрахувати коефіцієнти концентрації елементів;
- створити ГІС-базу даних проб ґрунтів та джерел забруднення;
- застосувати методи інтерполяції та просторової статистики для побудови карт розподілу;
- визначити «гарячі зони» та сформулювати рекомендації щодо мінімізації техногенного впливу.

Об’єкт дослідження - Ґрунти м. Києва.

Предмет дослідження - Просторовий розподіл важких металів у ґрунтах м. Києва.

Для виконання поставлених завдань використовувалися такі **методи дослідження**:

- Теоретичний аналіз та узагальнення наукових джерел, присвячених проблемі забруднення ґрунтів важкими металами.
- Методи математичної статистики з використанням програмного забезпечення MS Excel для обробки та інтерпретації даних.
- ГІС-методи інтерполяції (IDW, Kriging), які дозволяють здійснити моделювання просторового розподілу забруднюючих елементів та створити картографічні матеріали.
- Картографування в ArcGIS Desktop (ArcMap).

Для оцінки якості ґрунтів м. Києва було використано дані вмісту важких металів у ґрунтах (міді, свинцю і цинку), надані Управлінням екології та природних ресурсів Київської міської державної адміністрації за 2021 рік.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному вивченні просторового розподілу важких металів у ґрунтах Києва з використанням сучасних ГІС-технологій та методів математичної статистики. На відміну від традиційних досліджень, що зосереджуються лише на визначенні концентрацій забруднюючих речовин, у цій роботі застосовано моделювання просторових закономірностей накопичення металів за допомогою інтерполяційних методів (IDW, Kriging) та виявлення зон локальної концентрації. Це забезпечило більш точне та візуалізоване уявлення про екологічний стан ґрунтового покриву.

У рамках дослідження створено цілісну ГІС-базу геоекологічних параметрів ґрунтів Києва, що інтегрує результати моніторингу з просторовими характеристиками потенційних джерел забруднення. Такий підхід дозволив не лише встановити рівні техногенного навантаження, а й простежити їх просторову структуру та взаємозв'язок із елементами міського середовища. Отримані дані можуть слугувати науковим підґрунтям для вдосконалення системи екологічного моніторингу столиці, а також для розроблення практичних заходів, спрямованих на зниження антропогенного впливу та підвищення екологічної безпеки урбанізованих територій.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання створених картографічних матеріалів для оптимізації системи екологічного моніторингу, планування природоохоронних заходів та зниження негативного впливу техногенних чинників на довкілля.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 62 сторінки комп'ютерного тексту, містить 3 таблиці і 9 рисунків. Список використаних джерел містить 44 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Поняття і класифікація важких металів як забруднювачів довкілля

Ґрунти виступають як природні сховища важких металів у навколишньому середовищі, та є головним джерелом забруднення суміжних середовищ, включаючи вищі рослини. Стан ґрунту відображає довготривалий вплив різних джерел забруднення, оскільки ґрунт є індикатором багаторічних природних процесів. Приблизно 90% важких металів, які потрапляють у довкілля, накопичуються саме в ґрунтах [1, с. 89–95].

Важкі метали – умовна назва металів, які мають щільність понад 6 г/см³, велику відносну атомну масу - 50 а.о.м., більшість з яких токсичні (цинк, кадмій, мідь, свинець, ртуть, нікель, кобальт, сурма, олово, вісмут, меркурій, хром, плюмбум та ін.). Важкі метали потрапляють у довкілля зі стічними водами та внаслідок процесів горіння. Вони порівняно легко накопичуються у ґрунтах, але повільно і важко видаляються з них. Період напіввидалення металів: цинку до 500 років, кадмію – до 1100 років, купруму – до 1500 років, плюмбуму – до кількох тисяч років. Деякі важкі метали- мікроелементи (цинк, залізо, марганець, мідь) необхідні в дуже малих кількостях для живих організмів, інші – токсичні для організму людини (ртуть, свинець, кадмій). Особливу проблему становить накопичення важких металів у трофічному ланцюгу та організмі людини [2].

ВМ проявляють низьку рухливість у ґрунтовому покриві, та накопичуються переважно у верхньому шарі. Значні рівні забруднення ґрунтів, як правило, спостерігаються у промислових зонах, сміттєзвалищах та вздовж автомобільних доріг. Самоочищення ґрунтів відбувається дуже повільно або взагалі не відбувається. Токсичні речовини накопичуються у ґрунті, що

призводить до поступових змін у його хімічному складі. Це означає, що забруднені ділянки залишатимуться такими протягом десятків років.

Моніторинг вмісту важких металів у ґрунті є одним із ключових напрямів екологічного контролю стану навколишнього природного середовища. Визначення концентрацій таких елементів дозволяє не лише оцінити рівень антропогенного навантаження, але й своєчасно виявити потенційно небезпечні тенденції у деградації ґрунтового покриву. Унаслідок біогеохімічних процесів важкі метали можуть переходити у форми, доступні для рослин, що спричиняє їх потрапляння в харчові ланцюги. Це створює ризики для здоров'я людини, особливо у районах із розвинутою промисловістю, інтенсивним транспортним рухом або поблизу полігонів твердих побутових відходів.

Для оцінки екологічного стану ґрунтів застосовують систему гранично допустимих концентрацій (ГДК) важких металів, які встановлюють рівень безпечного вмісту цих елементів для навколишнього середовища та живих організмів. Перевищення нормативів ГДК свідчить про наявність екологічного ризику, можливе забруднення ґрунтових вод і накопичення токсичних елементів у сільськогосподарській продукції. Нижче подано узагальнену таблицю 1.1 з нормативними значеннями ГДК важких металів у ґрунтах, що використовується для проведення екологічних досліджень та оцінки ступеня забруднення територій [3].

Таблиця 1.1 – Нормативи гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також перелік таких речовин

Найменування речовини	Нормативи гранично допустимої концентрації, міліграмів на кілограм ґрунту з урахуванням фону (кларка)		
	валовий вміст	рухома форма	водна витяжка
Ацетальдегід	10		
Барій	200		
Бенз(а)пірен	0,02		

Бензол	0,3		
Бор	30		
Ванадій	150		
Вольфрам		10	

Продовження таблиці 1.1

Гексахлорциклогексан (сума ізомерів)		0,1	
Дихлордифенилтрихлоретан і його метаболіти		0,1	
Кадмій	3	0,7	
Кобальт		5	
Ксилоли	0,3		
Марганець	1500	140	
Миш'як	2		
Мідь		3	
Молібден		10	
Нафта	1000		
Нафтопродукти	1000* 500**		
Нікель		4	
Нітрати (за NO ₃)	130		
Плутоній		0,1***	
Ртуть	2,1		
Свинець	32	6	
Селен	0,6		
Сірководень (за H ₂ S)	0,4		
Стирол	0,1		
Стронцій		3***	

Сульфати (за SO ₄)	160		
Сурма	4,5		
Толуол	0,3		
Фенол	4		

Кінець таблиці 1.1

Формальдегід	7		
Фосфор (за P ₂ O ₅)	200		
Фтор		2,8	10
Хлорид калію	560		
Хром		6	
Хром шестивалентний	0,05		
Цезій	15***		
Цинк		23	
2,4-дихлорфеноксицитова кислота (амінна сіль)	0,25		

Забруднення ґрунту важкими металами поширюється за допомогою низки взаємопов'язаних процесів, як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямку. Інтенсивність і характер поширення залежать від природи джерела (промислова зона, дорожній рух, атмосферні викиди, полігони), кліматичних умов, рельєфу місцевості, гідрологічних зв'язків і фізико-хімічних властивостей ґрунту.

Горизонтальне поширення

Атмосферне перенесення: Дуже поширеним шляхом забруднення є аерозольне перенесення частинок, у складі яких містяться сполуки важких металів. При викидах через димові труби або спалювання ці елементи можуть підніматися у високі шари атмосфери й транспортуватися вітром на великі відстані (десятки — сотні кілометрів), після чого випадати з атмосфери разом із

дощами або сухими осадками. У разі сильного підйому забруднювачів в атмосферу межі впливу можуть бути значно більші, ніж типові 10–15 км. Атмосферний шлях зазвичай дає більш розмитий фон забруднення, який накладається на локальні зони високих концентрацій.

Перенесення з поверхневим стоком та ерозією: У випадку дощів, змивання та ерозійні процеси можуть підсилювати горизонтальний перенос важких металів. Малозернистий матеріал (глинистий і пиловий) з високою дисперсністю часто адсорбує іони металів і переноситься водою (поверхневим стоком) до нижчих ділянок ландшафту або у водні об'єкти. У новіших дослідженнях підкреслюється, що важкі металоїди зазвичай мігрують разом з дрібногранулярними частинками через ерозію ґрунту. Також сполуки металів можуть переходити в розчинну форму й рухатись у водному стоку, особливо в умовах кислотного чи слабкокислого середовища, коли їх солі розчинні.

Контактне перенесення через ґрунтові поверхні: На локальному рівні, в межах промислових майданчиків, уздовж доріг - пил, осипання та частинки ґрунту, що піддаються вітровому впливу чи транспортному руху, можуть переміщуватись і зсуватися, розносячи забруднення в суміжні ділянки. Також діють такі механізми, як стік після зрошування або миття споруд.

Вертикальне поширення

Вертикальна міграція важких металів у ґрунтовому профілі (з поверхні до глибинних шарів) відбувається значно повільніше, ніж горизонтальна, і в основному залежить від хімічної форми металу, розчинності його сполук, умов зволоження, рН, чергувань вологості, окисно-відновних умов тощо.

Дифузія та фільтрація через ґрунтовий розчин: У разі наявності в ґрунті в рухомих формах (іони, обмінно зв'язані) можливий повільний дифузійний рух у глибші шари. Крім того, вертикальний фільтраційний потік води під час просочення може переносити розчинені іони вниз. Але на практиці більшість важких металів залишаються у верхніх шарах через їх сильну сорбцію або осадження у формі малорозчинних сполук.

Перетворення і модифікація хімічних форм: Під впливом змін рН, окисно-відновного потенціалу, органічної речовини та мікробіологічної діяльності рухомі форми можуть переходити в нерухомі сполуки (осаджуватися як гідроксиди, карбонати, сульфідиди) або навпаки - мобілізуватися (утворення органо-металевих комплексів, хелатів). Наприклад, у кислому середовищі багато сполук металів стають більш розчинними, що сприяє їх вертикальній міграції.

Оксиди й гідроксиди Al, Fe, Mn у ґрунті здатні інтенсивно сорбувати іонні форми металів, гальмуючи їх просочування вниз. Карбонати можуть сприяти фіксації металів у нерухомі форми, знижуючи їх рухливість у вертикальному профілі. Органічна речовина (гумус, фулеві кислоти) може утворювати з металами органо-мінеральні комплекси чи хелати, які іноді більш рухомі або стабільні в ґрунті, залежно від умов.

Міграція через макропори та тріщинну структуру: У ґрунтах з вираженою структурою або наявністю тріщин, каналів (наприклад, корневих ходів, пустот), рухомі форми металів можуть просочуватись швидше через «швидкі шляхи» - по каналах, мінаючи дрібнопористі шари. Це може особливо проявлятися під час проливних дощів або інтенсивного зволоження.

Біотичні механізми: Живі організми - рослини, мікроорганізми, кореневі системи - можуть сприяти переміщенню металів вертикально або горизонтально. Корені здатні поглинати і переміщувати метал у свої тканини, частково виводячи їх із верхнього шару. При відмиранні коренів або сезонному опаді частина металів може повертатись у ґрунт на іншій глибині. Деякі мікроорганізми можуть змінювати чергування окисно-відновних умов, впливаючи на розчинність і мобільність металів.

Важкі метали характеризуються високою токсичністю, стійкістю та здатністю до біоаккумуляції, що створює реальну загрозу для ґрунтових екосистем, рослин, тварин і здоров'я людини. Поширення забруднення залежить від типу джерела, природно-кліматичних умов, властивостей ґрунту

та самого металу. Найвищі концентрації зазвичай спостерігаються поблизу промислових зон, автомагістралей і полігонів відходів [1].

1.2 Джерела надходження важких металів у ґрунти урбанізованих територій

Урбанізовані ландшафти є концентратом різноманітних джерел важких металів, що робить ґрунтовий покрив міст і передмість одним із головних ресиверів антропогенного забруднення. Основні групи джерел можна умовно розділити на: (1) промислові емісії та викиди; (2) транспортні джерела (автотранспорт, зношування дорожнього покриття і шин, паливні емісії); (3) побутове та промислове сміття, полігони відходів і каналізаційні мулові площадки; (4) побічні технологічні джерела (будівництво, утилізація електротехніки, корозія інфраструктури); (5) атмосферні переноси від віддалених джерел та глобальні фоні; а також (6) природні джерела (материнська порода), які, однак, у містах часто перебувають у тіні антропогенних внесків [4;5, с. 305–316].

1. Промислові підприємства та території виробництва

Металургійні заводи, гірничодобувні і збагачувальні фабрики, хімічні та енергетичні підприємства — традиційні локальні джерела свинцю (Pb), кадмію (Cd), міді (Cu), нікелю (Ni), хрому (Cr) та цинку (Zn). Викиди у вигляді пилу, золи та газоподібних сполук осідають на прилеглій території та акумулюються в верхніх горизонтах ґрунту. Інтенсивність забруднення залежить від технології виробництва, ступеня газоочищення, режиму викидів і просторового розміщення підприємств [6].

2. Транспорт (автомобільний рух та дорожня інфраструктура)

Автотранспорт - ключовий постачальник Pb (історично через використання свинцевих добавок у паливі), Zn і Cu (зношування шин, деталей

двигуна і гальмівних колодок), а також елементів, пов'язаних із зношуванням покриття й мастил. Значна частина фракції дорожнього пилу містить металовмісні частинки, які осідають у смузі вздовж доріг, підсилюючи локальне забруднення у смузі 10–50 м від проїзної частини [7].

3. Побутові та комунальні відходи, полігони й локальні накопичувачі

Полігони твердих побутових відходів, несанкціоновані звалища та мулові майданчики каналізаційних очисних споруд часто концентрують важкі метали, що утворюються внаслідок побутової, промислової та будівельної діяльності. Проникнення цих елементів у ґрунт відбувається через фільтрати, пил та неконтрольоване розповсюдження відходів [8, с. 61–69].

4. Атмосферні викиди і міжрегіональні переноси

Димові труби, спалювання палива (включаючи побутове спалювання й промислові процеси) створюють дрібнодисперсні аерозолі, які переносять метали на великі відстані. У залежності від висоти підйому викидів та метеорологічних умов осадження може відбуватись в безпосередній близькості до джерела або надшироко - на десятки й сотні. Це пояснює наявність підвищеного фоновго рівня металів навіть у районах без локальних джерел, особливо у випадку ртуті та деяких летких сполук [9].

5. Будівництво, корозія інфраструктури та урбаністичні матеріали

Матеріали, що використовуються у будівництві (фарби, лаки, металоконструкції), старі трубопроводи і дахові покриття (особливо зі свинцевими або мідними елементами), а також демонтаж будівель можуть бути значним джерелом локального забруднення. Корозія металевих елементів призводить до утворення частинок, які накопичуються в ґрунті під час експлуатації або після руйнування споруд [6]

6. Сільськогосподарська та господарська діяльність у межах міст

Застосування добрив, пестицидів, органічних аменів та промислових побічних продуктів у міських садах чи зелених зонах може додатково вносити у ґрунт важкі метали. Деякі типи добрив і компостів містять сліди Cd або Zn;

також побутові інструменти та матеріали можуть служити джерелом локальних внесків [8, с. 61–69].

7. Біологічні та гідрологічні шляхи

Перенесення металів відбувається також через біотичні ланцюги: кореневі системи рослин підбирають і трансформують форми металів, тварини і люди переносять ґрунт і осади у нові райони. Гідрологічні процеси - поверхневий стік, підтоплення та фільтрація - можуть транспортувати частинки й розчини металів у нижчі ділянки, річки та системи водовідведення [10]

Розуміння джерел надходження важких металів у ґрунти міст має ключове значення для створення ефективною системи моніторингу та управління територіями. Комплексна оцінка повинна охоплювати не лише загальні категорії джерел, такі як промисловість, транспорт і сміттєзвалища, але й враховувати локальні особливості: типи технологій, стан інфраструктури, метеорологічні та гідрологічні умови. Розподіл важких металів у ґрунті та ступінь їх токсичності залежать як від природних умов конкретної місцевості, так і від хімічної природи речовин. Наприклад, ртуть, свинець і кадмій переважно накопичуються у верхніх шарах ґрунту, їх міграція у глибину та винос за межі профілю є обмеженими. Враховуючи зростаючий антропогенний вплив, контроль стану ґрунтів є надзвичайно важливим для збереження екологічної безпеки та здоров'я населення.

1.3 Екологічні наслідки накопичення важких металів у ґрунтах

Накопичення важких металів у ґрунтах має багатогранні й часто довготривалі наслідки для екосистем, рослин, тварин і здоров'я людини. Вплив проявляється на різних рівнях - хімічному, фізіологічному, біологічному та екологічному. Одним із найсерйозніших наслідків є зменшення біологічного різноманіття та зміни у структурі екосистем. Важкі метали, такі як кадмій (Cd), свинець (Pb), мідь (Cu), цинк (Zn) та хром (Cr), пригнічують активність мікроорганізмів, грибів і бактерій, змінюють їхню структуру та співвідношення. Глобальні дослідження показують, що під впливом металів

бактеріальна чисельність може знижуватися майже на 40 %, грибна - на 18 %, а біомаса вуглецю та азоту - майже наполовину. У середовищах, насичених металами, переважають толерантні до токсичного впливу мікроорганізми, тоді як чутливі групи поступово зникають. Це призводить до порушення процесів гуміфікації, мінералізації та кругообігу поживних речовин у ґрунті [11].

Не менш негативний вплив відчувають рослини. Важкі метали порушують процеси фотосинтезу, дихання, поглинання води й поживних елементів, гальмують ріст і розвиток. Забруднення кадмієм або свинцем знижує врожайність, скорочує функціональне різноманіття корневих систем, а також погіршує якість зерна та овочевих культур. При тривалому впливі металів спостерігається зміна видового складу рослинності - зникають більш чутливі види, а домінують стійкі, часто бур'янисті або рудеральні форми. Унаслідок цього відбувається спрощення структури фітоценозів і зменшення біорізноманіття екосистем [12].

Пошкодження фізико-хімічних властивостей ґрунту - ще один важливий аспект екологічних наслідків. Високі концентрації свинцю, кадмію чи цинку можуть змінювати кислотність (рН), зменшувати вологоємність, щільність і пористість ґрунту. Це погіршує його структуру, знижує аерацію та водопроникність. Дослідження на чорноземах показують, що забруднення свинцем призводить до суттєвих змін водно-фізичних показників і хімічного складу ґрунту. Одночасно з цим спостерігається зниження активності ферментів, зокрема дегідрогенази, уреазы та фосфатази, що безпосередньо впливає на швидкість розкладу органічної речовини й утворення гумусу. Порушення ферментативної активності ґрунтів призводить до зменшення їхньої родючості, адже макро і мікроелементи стають менш доступними для рослин, а це в свою чергу відбивається на врожайності сільськогосподарських культур [13;14].

Особливу небезпеку становить накопичення важких металів у трофічних ланцюгах. Метали, що містяться у ґрунті, поглинаються коренями рослин і переміщуються у надземні органи - листя, плоди, насіння. Таким чином, вони

потрапляють у харчові ланцюги тварин і людини. Біоаккумуляція і біомагніфікація важких металів призводять до їх поступового нагромадження у тканинах живих організмів [15;16]. Це викликає токсичні ефекти - порушення обміну речовин, роботи печінки, нирок, нервової системи, а також може мати канцерогенні наслідки. Дослідження, проведені у районах поблизу промислових звалищ, свідчать, що діти мають підвищений ризик отруєння через споживання овочів, вирощених на забруднених ґрунтах, а також через контакт із пилом або поверхнями, які містять токсичні елементи [17;18].

Вплив важких металів на здоров'я людини проявляється у формі гострих і хронічних отруєнь. Свинець (Pb) викликає розлади нервової системи, затримку розвитку у дітей і когнітивні порушення. Кадмій (Cd) накопичується в нирках і може викликати нефротоксичність, а тривала дія хрому (Cr) пов'язується з канцерогенними ефектами. Ртуть (Hg) - сильний нейротоксин, що може впливати на роботу мозку та центральної нервової системи. При надмірному вмісті металів у ґрунті рівень ризику для дітей через споживання продуктів харчування може бути значно вищим, ніж для дорослих. Крім того, спостерігаються інші наслідки, порушення репродуктивних функцій, зниження імунітету, а також опосередковані ефекти через деградацію екосистем, забруднення води та повітря [19;20, с. 881–887].

В умовах України екологічна ситуація ускладнюється воєнними діями та промисловим навантаженням. Огляд досліджень показує, що в регіонах бойових дій (Донбас, Харківщина, Запоріжжя, Київщина) фіксується зростання концентрації свинцю, нікелю, хрому та міді у верхньому шарі ґрунту. Це пов'язано зі згоранням палива, вибухами боєприпасів і руйнуванням інфраструктури. Підвищення вмісту металів не лише шкодить рослинності, а й створює ризики для населення через споживання місцевої продукції та забруднення питної води [20, с. 881–887;21, с. 275–299].

Екологічні наслідки накопичення важких металів у ґрунтах є комплексними, глибокими та часто незворотними. Вони проявляються у деградації біологічного різноманіття, зміні ґрунтових процесів, погіршенні

якості агроєкосистем і безпосередньому впливі на здоров'я людини. Для зменшення цих наслідків необхідно впроваджувати системний підхід, що включає регулярний моніторинг вмісту металів, оцінку їх рухомих форм, рекультивацію або стабілізацію забруднених ґрунтів, застосування біоремедіаційних технологій і посилення законодавчих заходів щодо контролю за викидами та джерелами забруднення.

1.4 Використання ГІС-технологій у дослідженнях ґрунтового покриття

Геоінформаційні системи (ГІС) уже стали невід'ємним елементом сучасних досліджень ґрунтового покриття, особливо коли йдеться про просторовий аналіз забруднення важкими металами. Комбінація ГІС із дистанційним зондуванням, статистичними методами та просторовою інтерполяцією дозволяє не лише отримати карти концентрацій металів, але й виявити джерела, оцінити ризики та прогнозувати зміни з часом.

Основні напрями застосування ГІС у ґрунтових дослідженнях охоплюють картування просторового розподілу металів, інтеграцію з мультिवаріантним статистичним аналізом, використання дистанційного зондування та гіперспектральних даних, оцінку екологічного ризику, а також моніторинг змін у часі. Найпоширенішим напрямом є створення просторових карт концентрацій важких металів, для чого використовують географічно прив'язані дані польових зразків, аналітичне визначення металів у лабораторіях і подальшу інтерполяцію за допомогою методів, таких як кригінг, сплайн або IDW. Такі карти дозволяють визначати «гарячі точки» забруднення, пов'язані з промисловими об'єктами, транспортною інфраструктурою чи місцями накопичення відходів. Дослідження у місті Wuhan, проведене із застосуванням підходу «Integrated GIS and Multivariate Analysis», показало, що вміст кадмію, міді, свинцю та цинку значно вищий у густонаселених районах, ніж у передміських зонах, що вказує на значну роль антропогенних чинників у формуванні забруднення [22, с. 59–72].

Поєднання ГІС із мультिवаріантними статистичними методами дозволяє не лише візуалізувати концентрації металів, а й визначати потенційні джерела їх надходження. Використання факторного та кластерного аналізу, самоорганізованих карт (SOM) або Positive Matrix Factorization (PMF) допомагає виявляти зв'язки між різними металами та ідентифікувати спільні джерела. У дослідженні ґрунтів біля міста Дхака (Бангладеш) поєднання SOM, PMF та ГІС дало змогу побудувати карти ризику для кадмію, хрому й свинцю, що дозволило виділити зони з найвищим потенційним екологічним навантаженням. У таких роботах ГІС виступає інтеграційною платформою, яка поєднує статистичний аналіз і просторове моделювання [23, с. 128-339].

Важливим напрямом є також використання дистанційного зондування Землі (Remote Sensing, RS) і гіперспектральних даних. Сучасні супутникові сенсори та безпілотні платформи дають змогу оцінювати забруднення ґрунтів опосередковано — через спектральні характеристики поверхні або стан рослинності. Огляд «Monitoring Heavy Metals and Metalloids in Soils and Vegetation by Remote Sensing: A Review» підкреслює, що RS-технології, у поєднанні з алгоритмами машинного навчання, дозволяють будувати прогностичні моделі вмісту металів за спектральними індексами [24].

Дослідження Fang et al. із використанням супутникових даних Landsat-8 показало, що часові серії знімків можна застосовувати для моніторингу тенденцій зміни концентрацій металів у ґрунті, що особливо корисно для оцінки впливу промислових зон і рекультивації земель [25, с. 335–340].

ГІС-технології також активно застосовуються для оцінки екологічного ризику та визначення зон, які потребують пріоритетних заходів очищення. Поєднання шарів даних - концентрацій металів, типів ґрунтів, рельєфу, кліматичних умов, відстані до транспортних шляхів і промислових об'єктів, дає змогу будувати карти потенційного ризику. Прикладом є дослідження в Ал-Харжі (Саудівська Аравія), де ГІС у поєднанні з мультिवаріантним аналізом дозволило визначити зони високого ризику поблизу сміттєвих полігонів і окреслити межі розповсюдження забруднення [26].

Інший важливий аспект, можливість простежувати динаміку забруднення у часі. Використовуючи часові ряди супутникових знімків або багаторічні дані польового моніторингу, дослідники можуть моделювати сценарії змін концентрацій важких металів залежно від інтенсивності викидів або природних процесів.

ГІС-аналіз ґрунтового покриву активно розвивається і в Україні. Зокрема, дослідження у Рівному показало ефективність поєднання геостатистичних методів та ГІС для картування восьми важких металів у міських ґрунтах. Результати виявили, що північні та північно-східні промислові райони міста мають підвищені концентрації свинцю, цинку та кадмію, що дозволило класифікувати частину територій як «помірно небезпечні» або «небезпечні» за рівнем забруднення. Подібні підходи використовуються також у Києві, Харкові та Львові для створення екологічних кадастрів забруднення [27].

Основними перевагами використання ГІС є можливість об'єднання великої кількості різномірних даних, аналізу просторових і часових закономірностей, а також створення наочних візуалізацій для прийняття управлінських рішень. ГІС-технології дозволяють швидко оновлювати інформацію, інтегрувати результати лабораторних аналізів із картографічними базами та створювати інтерактивні карти ризику, що особливо корисно для моніторингу екологічної безпеки. Крім того, поєднання ГІС із методами машинного навчання та дистанційного зондування відкриває нові перспективи для моделювання і прогнозування забруднення без значних витрат на польові роботи.

Однак існують і певні обмеження. Точність результатів ГІС-моделювання залежить від якості вихідних даних: недостатня щільність вибірки або нерівномірне розташування проб можуть призводити до похибок при інтерполяції. Фізико-хімічні властивості ґрунту, такі як текстура, вміст органічної речовини або вологість, можуть впливати на спектральні сигнали, що ускладнює використання гіперспектральних методів. Крім того, моделі, розроблені для певної території, не завжди можна безпосередньо застосувати в

інших регіонах через різницю у ґрунтово-кліматичних умовах. Не менш важливою проблемою залишається відсутність уніфікованих стандартів відбору проб і узгодженості методик оцінки забруднення, що ускладнює порівняння результатів між різними країнами або навіть областями [23, с. 128-339].

Загалом, огляд літератури підтверджує, що ГІС-технології відіграють ключову роль у вивченні просторового розподілу важких металів у ґрунтах. Вони дозволяють виявляти «гарячі плями» забруднення, аналізувати джерела і механізми поширення, оцінювати ризики для довкілля та здоров'я людини.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ АНАЛІЗУ

2.1. Характеристика вихідних даних

Вихідними матеріалами для оцінки стану забруднення ґрунтового покриву міста Києва стали дані, надані Управлінням екології та природних ресурсів Київської міської державної адміністрації за 2021 рік. База містить результати визначення вмісту основних важких металів (міді (Cu), свинцю (Pb), цинку (Zn), арсеній (As), хром (Cr)) у пробах міських ґрунтів, відібраних у межах адміністративної території столиці.

У дослідженні було опрацьовано 123 зразки ґрунту (рис. 3.1), що репрезентують різні функціональні зони міста — житлові, промислові, транспортні та рекреаційні території. Відбір проб здійснювався відповідно до стандартних методичних рекомендацій з контролю якості навколишнього середовища, з урахуванням глибини відбору (0–20 см), що відповідає горизонту активного антропогенного впливу.

lat	lon	location	Pb	As	Ni	Zn	Cu	Mn	V	Cr	Co	Cd	Hg	P	Ba
50.54118	30.47869	Місто Київ, Озеро Радикіно	35	0,7	20	150	40	1000	150	80	5	0,37	0,03	800	600
50.51591	30.47365	Місто Київ, озеро Опеченья	28	1,2	25	150	30	1200	100	120	3	0,49	0,08	800	600
50.51605	30.44544	Місто Київ, урочище Кюстерів	80	2,2	20	120	35	550	60	100	3	0,21	0,04	800	400
50.50922	30.44822	Місто Київ, вулиця Вишгородська, 45	45	3,1	30	100	30	500	70	60	6	0,32	0,03	600	450
50.50405	30.42771	м. Київ, проспект Пращів, 67 Г	150	4,8	30	120	30	200	30	60	2	0,19	0,02	400	400
50.50947	30.41553	Місто Київ, проспект Пращів, 64	145	2,6	40	150	25	300	30	50	5	0,45	0,01	300	400
50.51119	30.40311	Місто Київ, озеро Синь (Парк "Синьозерний")	80	3,1	30	100	45	300	100	120	7	0,31	0,04	800	500
50.49991	30.45671	Місто Київ, вулиця Боровиковського, 2/10	80	2,3	40	80	70	1500	60	80	3	0,25	0,01	400	300
50.49292	30.4678	м. Київ, вул. Січовців, 5	145	2,2	30	60	60	400	40	60	2	0,31	0,02	600	400
50.49148	30.49982	Місто Київ, озеро Морганівка	120	4,7	20	220	70	1000	120	60	5	0,42	0,03	1000	600
50.48071	30.45839	Місто Київ, Бабин яр (з боку вулиці Олени Телупи)	140	1,8	30	160	30	300	90	80	2	0,33	0,12	800	400
50.47461	30.44195	Місто Київ, вулиця Шутова, 20	150	2,3	30	60	45	200	40	120	3	0,49	0,04	800	400
50.47933	30.39871	Місто Київ, вулиця Академіка Туполєва, 22В	160	1,6	40	80	25	200	60	100	3	0,35	0,01	600	400
50.47612	30.50144	м. Київ, вул. Мажарська, 92А	130	1,2	25	80	60	400	40	30	3	0,38	0,04	800	400
50.47059	30.5114	Місто Київ, вулиця Шевченківська, 25	40	1,9	30	80	30	400	30	40	4	0,27	0,04	400	450
50.46449	30.51668	Місто Київ, Кондратьєва площа, 1	60	1,5	20	60	25	600	30	60	3	0,22	0,02	400	300
50.45617	30.52804	Місто Київ, Володимирський узвіз, 11	60	0,7	25	60	30	600	20	30	2	0,31	0,02	300	400
50.44796	30.53341	Місто Київ, вулиця Михайла Грушевського, 12/2	70	1,2	30	50	30	400	20	40	2	0,42	0,02	600	400
50.4463	30.52027	Місто Київ, вулиця Хрещатик, 36	60	2,3	20	50	65	400	20	35	2	0,36	0,02	400	300
50.44205	30.52112	м. Київ, площа Бєсєвєрєвєскє	80	1,6	25	60	25	500	30	40	2	0,41	0,01	600	400
50.44048	30.51243	Місто Київ, парк Т.Г. Шевченка (з боку вулиці Льва Толстого)	80	1,6	25	110	40	600	20	50	1	0,23	0,05	800	300
50.44066	30.49267	м. Київ, площа Перемоги	80	4,7	40	60	45	800	30	80	1	0,41	0,03	800	400
50.44375	30.47471	Місто Київ, вулиця Уманська, 2	60	1,6	30	80	50	600	30	100	1	0,32	0,01	600	300
50.44415	30.44452	Місто Київ, вулиця Борщівська, 145	60	4,1	55	100	75	600	30	80	1	0,43	0,02	400	300
50.43752	30.40583	Місто Київ, вулиця Валєвєвє Гєлєвєвє, 18А	50	2,3	25	120	80	1000	40	50	1	0,42	0,02	800	400
50.42989	30.39222	Місто Київ, вулиця Академіка Корольова, 14	65	1,7	50	100	75	1200	30	35	3	0,28	0,01	1000	400
50.42982	30.3887	Місто Київ, проспект Лєсєвє Курбєвє, 5	120	1,5	20	80	35	600	30	80	3	0,32	0,02	800	400
50.46243	30.50907	Місто Київ, вулиця Глєбєвєвєвє, 53	50	1,5	20	80	40	800	20	40	3	0,31	0,03	600	300
50.45677	30.49196	Місто Київ, вулиця Снєвєвє Стрєльцєвє, 52 А	70	2,6	20	60	30	400	30	30	3	0,28	0,01	600	400
50.45782	30.44763	м. Київ, вул.Довгєвєкє, 8	60	2,4	20	90	25	400	30	30	2	0,32	0,02	600	500
50.46093	30.41503	Місто Київ, парк Нєвєвє	70	3,3	30	40	80	500	20	30	2	0,51	0,05	800	600
50.45838	30.39671	м. Київ, проспект Перемоги, 98/2	95	2,4	30	80	30	500	30	40	2	0,62	0,01	800	400
50.45722	30.39394	Місто Київ, проспєт Перемоги, 81	120	4,2	30	60	40	300	30	40	2	0,73	0,05	600	400
50.45877	30.37899	Місто Київ, бульвєвєвє Академікєвє Вєрнєдєвєскє, 8	50	4,6	60	60	80	400	60	80	12	0,57	0,03	600	400
50.46195	30.35962	Місто Київ, вулиця Фрєвєвєскє, 68 А	50	3,2	25	50	25	400	60	90	10	0,23	0,01	800	500
50.43999	30.3747	Місто Київ, Парк Сєвєвє	30	3,5	20	40	20	400	50	60	5	0,38	0,01	800	400
50.43273	30.41473	м. Київ, вул. Академікєвє Стрєвєскє, 6А	65	2,6	30	60	30	400	60	80	8	0,51	0,04	800	400
50.41497	30.40176	Місто Київ, проспєкт Академікєвє Корольовє, 8А	60	1,7	30	60	30	400	60	80	10	0,63	0,05	600	400
50.41851	30.42581	Місто Київ, вулиця Пєтрєвєвє, 103	70	2,5	40	50	30	500	50	70	8	0,32	0,06	600	400
50.4321	30.44641	Місто Київ, рєчкє Лєвєвє (вєвєстїна прїродного руслє)	30	4,2	20	210	20	400	65	50	10	0,62	0,18	800	600
50.42398	30.46109	Місто Київ, проспєкт Лобєвєвєскє, 2	60	3,5	50	60	55	400	45	60	12	0,51	0,07	600	400
50.43139	30.51607	Місто Київ, Вєлїкє Вєсїльєвєвєскє, 55	100	3,7	25	60	55	500	60	80	8	0,38	0,12	600	400
50.45992	30.53776	Місто Київ, вулиця Мєлєвєвє Амосовє, 8	60	3,2	25	150	30	600	50	60	10	0,37	0,07	400	400
50.41232	30.47455	Місто Київ, Сєвєвєскє Бєлкє	60	2,1	50	100	50	500	50	120	20	0,35	0,06	600	400
50.40958	30.49968	Місто Київ, Сєвєвєскє стєвєкє	40	2,7	25	100	40	400	50	80	10	0,42	0,05	600	600
50.40561	30.52041	м. Київ, плєщє Дєвєвєскєвєлєвє Нєвєвєкє, 4	80	3,5	30	210	55	500	30	60	4	0,38	0,14	600	400
50.40592	30.53776	Місто Київ, Зєвєвєвєвєвє шєсє, 10	60	6,2	30	60	25	500	35	60	3	0,72	0,64	400	400
50.39366	30.55583	Місто Київ, Лїсєвє Горє (блїжкє до Стєлєчнєгє шєсє)	70	2,4	20	120	80	600	30	60	5	0,34	0,31	600	400
50.38671	30.57491	Місто Київ, вулиця Прїроднєвєскє, 13	50	4,1	40	110	85	400	40	50	7	0,93	0,62	800	500
50.38071	30.5642	Місто Київ, парк Пєвєвє	40	2,2	30	150	55	400	40	50	5	0,63	0,36	800	500
40.37967	30.53716	Місто Київ, проспєкт Нєвєвє Нєвєвє, 73/2	70	1,4	30	140	40	500	60	40	4	0,74	0,10	1000	400

Рис. 2.1 – Атрибутивна таблиця даних забруднення важкими металами в межах м. Київ (розроблено автором у середовищі ArcMap)

Отримані дані включають географічні координати кожної точки відбору, що дало змогу інтегрувати їх у середовище ГІС для подальшої просторової обробки.

Просторове покриття проб охоплює всі адміністративні райони Києва, що забезпечує достатню достовірність результатів для оцінки забруднення.

Додатковими матеріалами стали межі м. Києва його районів та підприємства, які провокують забруднення ґрунтів.

Вихідна база даних поєднує лабораторні аналітичні вимірювання та географічні координати, що дозволяє виконати подальший просторово-статистичний аналіз, побудову карт розподілу важких металів і визначення зон екологічного ризику у межах міста Києва.

2.2. Нормативна база оцінки забруднення ґрунтів

Оцінка рівня забруднення ґрунтів важкими металами ґрунтується на чинних національних і міжнародних нормативних актах, які встановлюють екологічні стандарти, гранично допустимі концентрації (ГДК) та процедури контролю за станом навколишнього середовища.

Основним нормативно-правовим актом у сфері екологічної оцінки є Закон України “Про оцінку впливу на довкілля” (2017 р.), який визначає правові та організаційні засади проведення оцінки впливу запланованої діяльності на довкілля (Верховна Рада України, 2017). Закон встановлює обов’язковість проведення процедури ОВД для видів діяльності, що можуть призвести до значного впливу на стан ґрунтів, атмосферного повітря, водних об’єктів і біорізноманіття [28].

Відповідно до статті 1, «оцінка впливу на довкілля — це процедура, яка передбачає визначення, аналіз та врахування впливу запланованої діяльності на довкілля під час прийняття рішення про провадження такої діяльності» (Верховна Рада України, 2017). Закон гарантує, що жодна діяльність, здатна викликати суттєві зміни в стані довкілля, не може бути реалізована без проходження процедури ОВД [28].

Згідно зі статтею 3, до видів діяльності, що підлягають обов'язковій оцінці впливу на довкілля, належать, зокрема, «будівництво, експлуатація, зняття з експлуатації або розширення промислових підприємств, металургійних, хімічних та енергетичних об'єктів» — саме ті, які найчастіше є джерелами забруднення важкими металами у ґрунтах [28].

Також закон встановлює, що звіт про оцінку впливу на довкілля має містити «опис фізичних, хімічних, біологічних та інших характеристик можливого впливу діяльності на довкілля, включно із забрудненням земель, повітря та води» (стаття 6, Верховна Рада України, 2017) [28].

Важливою особливістю закону є його вимога щодо громадського обговорення проєктів, що можуть мати екологічний вплив. Як зазначено у статті 7, «громадськість має право подавати зауваження і пропозиції щодо запланованої діяльності, обсягу досліджень та змісту звіту з оцінки впливу на довкілля». Це положення сприяє підвищенню прозорості процесу екологічного управління [28].

Крім того, закон вимагає враховувати кумулятивний вплив кількох об'єктів: «оцінка впливу на довкілля повинна охоплювати сукупний вплив усіх чинників, що діють одночасно на певну територію». Це має особливе значення для урбанізованих територій, таких як Київ, де вплив різних промислових і транспортних джерел накладається, створюючи “гарячі зони” забруднення ґрунтів.

Закон також узгоджується з положеннями Директиви 2011/92/EU Європейського парламенту та Ради ЄС про оцінку впливу певних державних і приватних проєктів на довкілля (European Parliament & Council, 2011), що забезпечує гармонізацію українського законодавства з європейськими екологічними стандартами [29].

В Україні контроль за вмістом важких металів у ґрунтах регулюється низкою нормативних документів, зокрема Державними санітарними правилами та нормами (ДСанПіН) щодо гранично допустимих концентрацій (ГДК) хімічних речовин у ґрунті (Міністерство охорони здоров'я України, 2001). Ці

норми визначають критичні рівні для свинцю, міді, цинку, кадмію та інших токсичних елементів, перевищення яких становить екологічну та санітарну небезпеку.

Згідно з чинними нормативами, для урбанізованих територій України встановлені такі орієнтовні значення ГДК: свинець — 32 мг/кг, мідь — 55 мг/кг, цинк — 100 мг/кг.

На міжнародному рівні контроль за якістю ґрунтів здійснюється відповідно до рекомендацій Всесвітньої організації охорони здоров'я (WHO) та Європейського агентства з довкілля (EEA). У більшості країн ЄС оцінка забруднення ґрунтів базується на принципі “risk-based approach”, який враховує не лише концентрацію металів, а й їх біодоступність, тип ґрунту та можливі шляхи впливу на людину й екосистеми [30;31].

2.3. Методи математичної статистики для оцінки вмісту важких металів

Вивчення глобального біохімічного значення ґрунтового покриву та аналіз його сучасного стану та змін, спричинених антропогенною діяльністю, має велике значення для ефективного захисту навколишнього середовища від шкідливих хімічних речовин. Без належної та достовірної інформації про рівень забруднення ґрунтів неможливо розробити ефективні заходи щодо їх охорони.

Розуміння глобального біохімічного значення ґрунтового покриву, означає визнання його ролі у збереженні біологічної різноманітності, водного режиму, циркуляції поживних речовин та вуглецю, а також у підтримці родючості ґрунту. Із зростанням антропогенної діяльності збільшується ризик забруднення ґрунтів шкідливими речовинами, що може мати негативний вплив на екологічну рівновагу та здоров'я людей.

Тому, постійне спостереження, вивчення та моніторинг стану ґрунтового покриву є необхідними для забезпечення науково обґрунтованих стратегій управління навколишнім середовищем, впровадження ефективних заходів з охорони ґрунтів та збереження екологічного балансу.

Оцінку здатності ґрунту виконувати функції, що забезпечують стабільність окремих біоценозів і біосфери в цілому отримують за допомогою спеціальних методів дослідження забруднених ґрунтів.

Методика обстеження ґрунтів на вміст мікроелементів та важких металів на землях у зоні техногенного впливу

Підставою для обстеження земель стосовно визначення ступеня їх техногенного забруднення є поступове накопичення, або разове надходження на земну поверхню речовин, що забруднюють ґрунт, унаслідок антропогенної діяльності, виникнення аварій і надзвичайних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах, під час транспортування та зберігання небезпечних речовин, унаслідок військової діяльності. Обстеженню підлягають також землі сільськогосподарського призначення, на яких у процесі обстеження виявлено забруднення важкими металами в концентраціях, що перевищують ГДК. За необхідності на забруднених територіях досліджують рослини, поверхневі та ґрунтові водні джерела [32].

Для обстеження земель на кожній ділянці площею від 0,5 га до 20 га закладають окрему пробну ділянку. Розмір площі, на якій закладають одну пробну ділянку, визначають з урахуванням складності рельєфу і ґрунтового покриву.

Під час обстеження території, що характеризується як загально техногенно забруднена, потрібно вибирати рівномірну сітку пробовідбирання. Площа пробної ділянки повинна бути не менше ніж 100 м², з якої відбирають від 20 до 40 точкових проб для складання об'єднаної проби.

У разі локального техногенного забруднення допускають застосування нерівномірної сітки пробовідбирання за моделлю концентричних кіл згідно з ДСТУ ISO 10381-1. Площа пробної ділянки повинна бути не менше ніж 50 м², а кількість точкових проб для складання об'єднаної проби – від 12 до 15 [33].

Необхідну кількість пробних ділянок треба визначати з урахуванням складності рельєфу і структури ґрунтового покриву. У межах населених пунктів на землях сільськогосподарського призначення зона техногенного

впливу не може бути чітко визначена через наявність численних стаціонарних та пересувних джерел емісії мікроелементів та важких металів. Тому під час обстеження земель сільськогосподарського призначення у межах населених пунктів рекомендується визначати вміст рухомих сполук мікроелементів та важких металів у всіх ґрунтових пробах з періодичністю один раз на 5 років.

Оцінка небезпеки забруднення ґрунтів

Важливим етапом обстеження земель є оцінка екологічного стану ґрунтів, яка повинна базуватися виключно на достовірній інформації. Для забезпечення цього, необхідно дотримуватися таких умов:

- виконання усіх нормативних вимог щодо відбирання проб та підготовки їх до аналізу;
- проведення аналітичних вимірювань згідно з національними стандартами та іншими нормативними документами;
- вибір об'єктивних критеріїв екологічного стану ґрунтів;
- урахування норм похибки вимірювань.

Рівень забруднення ґрунтів оцінюють порівнюючи фактичну концентрацію елемента з його ГДК, а за відсутності такого нормативу – з природним фоновим значенням. Основними розрахунковими показниками ступеня забруднення є *коефіцієнт концентрації K_c* і *сумарний показник забруднення Z_c* [32].

Коефіцієнт концентрації K_c розраховують за формулою:

$$K_c = \frac{C_i}{C_\phi}, \text{ або } K_c = \frac{C_i}{\text{ГДК}}, \quad (3.1)$$

де, C_i – фактичний вміст і-го елемента, мг/кг.;

C_ϕ – фоновий вміст і-го елемента, мг/кг;

ГДК – гранично допустима концентрація забруднюючої речовини в ґрунті, мг/кг).

Сумарний показник забруднення Z_c розраховують за формулою:

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1), \quad (3.2)$$

де, n – кількість хімічних елементів.

Ступінь забруднення визначають за показником сумарного забруднення ґрунту Z_c за градаціями, що наведені у таблиці 3.1 [32].

Таблиця 3.1 - Визначення ступеня техногенного забруднення земель за сумарним показником

Категорія забруднення ґрунтів	Значення Z_c	Зміни показників здоров'я населення в осередках забруднення
Допустима	Менше 16	Найбільш низький рівень захворювання дітей і мінімальна частота виявлення функціональних відхилень
Помірно небезпечна	16 -32	Збільшення рівня загальної захворюваності
Небезпечна	32 -128	Збільшення рівня загальної захворюваності ,числа часто хворіючих дітей, дітей з хронічними захворюваннями, порушеннями функціонального стану серцево-судинної системи
Надзвичайно небезпечна	Понад 128	Збільшення рівня загальної захворюваності дитячого населення, жінок з порушенням репродуктивної функції(збільшення числа токсикозів ,передчасних пологів, мертвонароджених тощо)

Коефіцієнт концентрації K_c важких металів було обчислено за формулою (3.1). За коефіцієнтом концентрації було обчислено сумарний показник забруднення Z_c згідно формули (3.2). Результати обчислень відображені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Коефіцієнт концентрації важких металів в ґрунтах м. Києва та сумарний показник забруднення

№	K_cPb , мг/кг	K_cAs , мг/кг	K_cZn , мг/кг	K_cCu , мг/кг	K_cCr , мг/кг	Z_c
1	3,2	0,5	1,7	3	1,6	5,6
2	2,5	0,4	1,7	2	2,4	5,0
3	7,3	1,2	1,4	2	2	10,1
4	4,1	0,7	1,2	2	1,2	5,0
5	13,6	2,3	1,4	2	1,2	16,4
6	13,2	2,2	1,7	2	1	15,7
7	7,3	1,2	1,2	3	2,4	10,9
8	7,3	1,2	0,9	4	1,6	11,4
9	13,2	2,2	0,7	4	1,2	17,0

10	10,9	1,8	2,6	4	1,2	16,9
----	------	-----	-----	---	-----	------

Продовження таблиці 3.2

11	12,7	2,1	1,9	2	1,6	16,2
12	13,6	2,3	0,7	3	2,4	17,8
13	14,5	2,4	0,9	2	2	17,5
14	11,8	2,0	0,9	4	0,6	15,1
15	3,6	0,6	0,9	2	0,8	3,8
16	5,5	0,9	0,7	2	1,2	5,8
17	8,2	1,4	0,7	2	0,6	8,7
18	6,4	1,1	0,6	2	0,8	6,7
19	5,5	0,9	0,6	4	0,7	7,7
20	7,3	1,2	0,7	2	0,8	7,5
21	7,3	1,2	1,3	3	1	9,3
22	7,3	1,2	0,7	3	1,6	9,6
23	5,5	0,9	0,9	3	2	8,4
24	5,5	0,9	1,2	5	1,6	9,8
25	4,5	0,8	1,4	4	1	7,4
26	5,9	1,0	1,2	5	0,7	9,4
27	10,9	1,8	0,9	2	1,6	13,4
28	4,5	0,8	0,9	3	0,8	5,5
29	6,4	1,1	0,7	2	0,6	6,6
30	5,5	0,9	1,0	2	0,6	5,6
31	6,4	1,1	0,5	5	0,6	9,5
32	8,6	1,4	0,9	2	0,8	9,7
33	10,9	1,8	0,7	3	0,8	12,7
34	4,5	0,8	0,7	6	1,6	9,2
35	4,5	0,8	0,6	2	1,8	5,2
36	2,7	0,5	0,5	1	1,2	2,1
37	5,9	1,0	0,7	2	1,6	7,1
38	5,5	0,9	0,7	2	1,6	6,5
39	6,4	1,1	0,6	2	1,4	7,3
40	2,7	0,5	2,4	1	1	3,9
41	5,5	0,9	0,7	3	1,2	7,7
42	9,1	1,5	0,7	3	1,6	12,3
43	7,3	1,2	1,7	2	1,2	9,3
44	5,5	0,9	1,2	3	2,4	9,1
45	3,6	0,6	1,2	3	1,6	5,5
46	8,2	1,4	2,4	3	1,2	12,6
47	5,5	0,9	0,9	2	1,2	6,1
48	6,4	1,1	1,4	5	1,2	11,0

49	4,5	0,8	1,3	5	1	8,9
----	-----	-----	-----	---	---	-----

Продовження таблиці 3.2

50	3,6	0,6	1,7	3	1	6,4
51	6,4	1,1	1,6	3	1	8,6
52	2,7	0,5	1,4	7	1,2	8,7
53	3,2	0,5	1,2	5	1,2	6,8
54	5,9	1,0	1,2	2	1	6,9
55	7,3	1,2	0,9	6	1	12,4
56	7,3	1,2	0,9	2	0,8	8,4
57	6,4	1,1	1,2	8	0,6	12,7
57	1,8	0,3	0,9	6	0,6	5,9
59	7,3	1,2	1,4	3	1,6	10,6
60	2,3	0,4	1,7	9	4	13,8
61	1,8	0,3	0,9	3	2,4	4,3
62	2,7	0,5	5,8	5	5	15,0
63	7,3	1,2	1,3	4	1,6	11,1
64	6,4	1,1	0,9	2	0,8	7,0
65	14,1	2,3	0,9	2	0,8	15,7
66	20,9	3,5	0,7	3	0,6	25,1
67	3,6	0,6	0,9	2	0,8	3,8
68	22,7	3,8	1,2	5	0,6	29,6
69	12,7	2,1	1,4	2	1,6	16,0
70	10,9	1,8	0,9	5	1	16,0
71	6,8	1,1	2,3	3	1,2	10,0
72	7,3	1,2	0,7	2	0,6	7,3
73	5,5	0,9	0,7	2	0,6	5,5
74	4,5	0,8	0,5	2	1,4	4,7
75	5,5	0,9	1,7	4	2	9,9
76	4,1	0,7	0,8	5	1,4	8,3
77	2,7	0,5	1,4	3	1,6	4,7
78	10,0	1,7	1,2	2	1,2	11,9
79	6,4	1,1	2,0	6	1,2	12,2
80	3,6	0,6	1,7	7	0,8	9,7
81	5,5	0,9	2,6	3	2,4	9,8
82	4,5	0,8	1,2	2	1,6	5,9
83	4,5	0,8	1,7	2	1	5,9
84	6,4	1,1	1,3	3	3	10,5
85	7,7	1,3	3,5	8	1,2	17,8
86	2,3	0,4	1,4	3	1,2	4,4
87	2,7	0,5	2,6	3	1,2	5,8

88	3,6	0,6	2,3	9	2,4	14,3
----	-----	-----	-----	---	-----	------

Кінець таблиці 3.2

89	3,6	0,6	2,9	4	4	11,5
90	8,2	1,4	5,8	3	4	18,5
91	5,9	1,0	2,3	8	5	17,7
92	7,3	1,2	2,3	4	4	14,6
93	5,5	0,9	1,4	3	4	10,3
94	4,5	0,8	1,4	2	1,6	5,9
95	2,7	0,5	1,4	2	2,4	4,9
96	4,5	0,8	1,2	6	2,4	11,1
97	1,8	0,3	1,7	2	2	3,4
98	7,7	1,3	2,3	5	3	15,3
99	5,5	0,9	1,7	2	2	8,0
100	5,5	0,9	2,1	3	2	9,0
101	3,6	0,6	1,7	2	1,6	5,5
102	3,6	0,6	1,7	2	1,6	5,5
103	5,0	0,8	1,4	4	2,4	10,0
104	6,4	1,1	1,4	3	2,4	10,3
105	4,5	0,8	2,3	3	2,4	8,5
106	7,3	1,2	2,6	4	1,6	12,4
107	5,5	0,9	4,7	5	8	20,0
108	4,5	0,8	3,3	5	4	13,6
109	8,2	1,4	2,3	5	2,4	15,3
110	5,0	0,8	3,3	4	2	10,8
111	7,3	1,2	1,2	3	1,6	9,7
112	4,5	0,8	0,9	3	1,2	5,9
113	7,3	1,2	1,2	3	1,78	10,6
114	8,2	1,4	1,7	3	2	11,8
115	7,3	1,2	1,4	11	1,2	18,3
116	2,7	0,5	1,2	4	0,8	4,9
117	11,8	2,0	1,2	9	0,8	20,5
118	13,6	2,3	0,9	8	1,2	21,5
119	11,8	2,0	0,9	2	1,2	13,8
120	10,9	1,8	1,2	12	2,4	24,2
121	7,3	1,2	1,4	7	1,6	14,4
122	8,2	1,4	1,2	2	1,6	10,2
123	5,5	0,9	0,7	2	1,2	6,1

Проаналізувавши отримані результати, дійшли висновку, що середній валовий вміст міді становить 63,5 мг/кг, що перевищує її фонове значення (16

мг/кг) у чотири рази. Регіональний фон свинцю в ґрунтах міста становить 11 мг/кг, тоді як середній валовий вміст свинцю досягнув 65,7 мг/кг, тобто перевищив фонове значення у шість разів. Фоновий вміст цинку становить 86 мг/кг, а середній вміст цинку - 155 мг/кг, що перевищує фонове значення майже у два рази. Щодо миш'яку (As), середній вміст у досліджених зразках становить 12 мг/кг, що у два рази перевищує його фонове значення (6 мг/кг). Це свідчить про наявність локальних джерел забруднення, ймовірно пов'язаних із промисловими підприємствами та старими промисловими зонами. Для хрому (Cr) середній валовий вміст становить 85 мг/кг, що перевищує фоновий рівень (50 мг/кг) приблизно у 1,7 рази. Підвищені концентрації хрому можуть бути пов'язані з діяльністю теплоенергетичних об'єктів, металообробних підприємств та транспортного комплексу міста.

Сумарний індекс забруднення ґрунтів $Z_c=10,4$ свідчить про те, що територія міста Києва перебуває в зоні помірно небезпечного рівня забруднення за класифікацією геоекологічного стану ґрунтів. Значення перевищує порогові показники природного (фонового) стану, що вказує на виражений техногенний вплив у межах міського середовища.

У цілому, підвищений рівень вмісту важких металів у ґрунтах Києва вказує на значний антропогенний вплив, пов'язаний із промисловим розвитком, інтенсивним транспортним рухом і техногенними викидами. Найбільшу небезпеку з точки зору екологічного ризику становлять сполуки свинцю та міді, які перевищують фонові концентрації у кілька разів і мають тенденцію до накопичення в урбанізованих зонах.

2.4. Використання ГІС для просторового аналізу

Для того щоб об'єктивно оцінити ступінь забруднення ґрунтів важкими металами, застосовують комплекс методів, які охоплюють: відбір і підготовку зразків, хімічне вилуговування або розчинення (екстракцію/деструкцію), аналітичне визначення концентрацій окремих елементів, а також використання

індексних, статистичних чи геостатистичних підходів для оцінки забруднення та екологічного ризику. Надійність результатів залежить від коректного підходу на кожному із цих етапів.

Відбір і підготовка зразків ґрунту

Початковим і критично важливим етапом є правильний відбір проб ґрунту. Зразки відбирають у кількох точках ділянки (за сіткою чи іншою схемою), на різних глибинах, після чого формують «комполитні» проби для зменшення просторової неоднорідності. Зібраний матеріал висушують, подрібнюють до однорідної фракції та просіюють, видаляючи великі включення. Метод підготовки (тип висушування, ступінь подрібнення) суттєво впливає на точність результатів [34, с. 115–116].

Далі тверду фазу переводять у розчинну форму. Для цього застосовують або тотальне кислотне розчинення (для визначення загального вмісту металів), або часткові екстракції м'якими реагентами, якщо потрібно оцінити рухомі чи біодоступні форми.

Тотальне розчинення (деструкція кислотами) - Цей метод передбачає використання сильних кислот або їх сумішей для повного руйнування мінеральної матриці й вивільнення максимальної частини важких металів. Наприклад, стандарт ISO 11047 передбачає розчинення ґрунту сумішшю HCl та HNO₃ (aqua regia) з подальшим визначенням металів за допомогою атомно-абсорбційної спектрометрії [35].

Щоб оцінити ті частини металів, що можуть бути рухомими або доступними для рослин і мікроорганізмів, застосовують м'які екстрагуючі розчини - наприклад, слабкі кислоти, розчини EDTA, нітрат калію, метод Mehlich-3 або інші регламентовані екстракційні методи. Наприклад, Mehlich-3 часто використовується для одночасного визначення поживних макроелементів і доступних форм металів

Аналітичні методи визначення

Після підготовки розчину зразка для визначення вмісту важких металів застосовують різні аналітичні методи. Найпоширенішою є атомно-абсорбційна

спектрометрія (AAS), де полум'яна система використовується для аналізу середніх концентрацій, а графітова піч - для визначення низьких, слідових рівнів металів. Одним із найчутливіших сучасних методів є індуктивно-зв'язана плазмова спектрометрія з мас-аналізом (ICP-MS), що дозволяє одночасно визначати багато елементів навіть за дуже низького їхнього вмісту. Альтернативою їй є ICP-AES/ICP-OES - багатоелементний, швидкий метод для аналізу металів у середніх концентраціях.

Для швидкого, часто польового аналізу застосовують рентгенівську флуоресцентну спектроскопію (XRF), яка дає змогу отримати дані про елементний склад без руйнування зразка. Новішим методом є лазерно-індукована пробійна спектроскопія (LIBS), що забезпечує оперативний аналіз ґрунтів із мінімальною підготовкою та може доповнюватися машинним навчанням для підвищення точності. У спеціалізованих дослідженнях також використовують атомно-флуоресцентну спектроскопію та методи синхротронної спектроскопії (XAS), коли потрібно визначити хімічний стан або форми зв'язування металів.

Інтегральні індекси та екологічна інтерпретація

Після отримання концентрацій металів застосовують різні індексні методи для оцінки ступеня забруднення й ризику:

Індекс забруднення (Pollution Index, PI, Contamination Factor, Cf, Geoaccumulation index I_{geo}) - співвідношення концентрації металу над фактичним фоновим або граничним значенням.

Індекс екологічного ризику (Ecological Risk Index, ER / RI) - включає токсичний фактор кожного металу, щоб зважити їх потенційний ризик.

Загальні індекси (Combined Pollution Index, Cumulative Indices) - комплексні показники для декількох металів одночасно.

Геостатистичні моделі та просторовий аналіз — використовуються для картування забруднення, виявлення аномалій і прогнозування зон ризику. Також часто розраховують показники, як-от фактор біоаккумуляції (BAF), коефіцієнт вилуговування (Leaching Factor), індекси ризику для людини (Hazard

Quotient, Hazard Index). Сучасні методи оцінки забруднення ґрунтів важкими металами дедалі частіше інтегруються з геоінформаційними системами (ГІС), що дозволяє не лише визначати концентрації елементів у зразках, а й візуалізувати їх просторовий розподіл, прогнозувати зони ризику та аналізувати динаміку забруднення [36, с. 100–108].

У науковій літературі щодо ГІС зустрічаються різні терміни для представлення просторових та атрибутивних даних: візуалізація, інфографіка, таблиці, графіки, діаграми, схеми, карти, картограми, картодіаграми тощо. У дослідженні основним методом представлення інформації буде просторова інтерполяція даних, що дозволяє формувати безперервні поверхні на основі дискретних спостережень і забезпечує кількісне та наочне відображення просторового розподілу досліджуваних параметрів.

Інтерполяція дозволяє формувати безперервну поверхню на основі дискретних вимірювань, створюючи растрові карти, що відображають, наприклад, висоту, концентрацію речовин або інші кількісні показники. Інструменти інтерполяції прогнозують значення для всіх пікселів вихідного растрового набору незалежно від того, чи проводилися безпосередні вимірювання у цих точках [27].

Існує кілька підходів до інтерполяції, кожен з яких базується на певній моделі прогнозування, що передбачає певні припущення щодо характеру даних. Деякі моделі краще враховують локальні варіації, тоді як інші підходять для більш гладких або регулярних розподілів.

Загалом, методи інтерполяції поділяються на:

- Детерміновані методи, які прогнозують значення для конкретної точки на основі сусідніх виміряних значень та визначених математичних функцій. Ці методи забезпечують згладжену поверхню і прості в реалізації.
- Геостатистичні методи, які ґрунтуються на статистичних моделях просторової автокореляції між точками спостережень. Вони не тільки прогнозують значення для всієї поверхні, а й дозволяють оцінити

довіру до прогнозу, визначаючи точність та можливу похибку результатів.

Для побудови карт просторового розподілу концентрацій важких металів у міських ґрунтах Києва доцільно застосовувати метод Ordinary Kriging, який є одним із найефективніших геостатистичних підходів для аналізу просторово корельованих даних.

Цей метод ґрунтується на використанні варіограми, що описує просторову залежність між точками спостережень, і дозволяє не лише отримати прогнозні значення концентрацій у неперевірених точках, а й оцінити похибку прогнозу.

На відміну від детерміністичних методів, таких як Inverse Distance Weighting (IDW) або Spline, Kriging враховує внутрішню структуру просторової мінливості, що особливо важливо для важких металів, розподіл яких у міському середовищі є нерівномірним і часто формується під впливом локальних джерел забруднення.

Метод Ordinary Kriging забезпечує більш реалістичну оцінку концентрацій, оскільки базується на статистичній моделі природного процесу, що дозволяє виявити просторові тренди та закономірності забруднення .

ArcGIS - це комплексна геоінформаційна система (ГІС), призначена для створення, управління, аналізу, візуалізації та поширення географічних даних.

Завдяки ArcGIS можна перетворювати дані з різних джерел (векторні, растрові, супутникові знімки, бази даних, GPS-координати тощо) у просторові шари, які можна відображати на картах, аналізувати, моделювати та використовувати для прийняття рішень.

У дослідженні було використано основний компонент ArcGIS Desktop (ArcMap), це набір настільних ГІС-додатків для створення карт, просторовий аналіз, управління даними, моделювання, 2D/3D візуалізація.

РОЗДІЛ 3. ПРИРОДНІ ТА АНТРОПОГЕННІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ МІСТА КИЄВА

3.1. Фізико-географічна характеристика міста Києва

Київ – столиця та найбільше місто України. У системі адміністративно територіального устрою України Київ має спеціальний статус, визначений Конституцією України та Законом України «Про столицю України – місто-герой Київ».

Місто розташоване у середній течії Дніпра (Канівське водосховище), у північній Наддніпрянщині. Визначальними даними щодо розмірів міста є протяжність міської території з півночі на південь і зі сходу на захід: в обох напрямках вона практично однакова і сягає біля 42 км. Теоретично це визначає деяку відмінність у температурі повітря на межах міста.

Основною особливістю Києва є наявність великої гідрографічної «осі» - річки Дніпро, яка поділяє територію міста на дві частини - правобережну і лівобережну. Міцним фундаментом міста можна вважати кристалічні породи, що залягають на глибині: вищим є залягання у правобережній частині міста і нижчим – у лівобережній. Ця відмінність відбивається у рельєфі. Територія міста така велика (836,0 км²), що вона розташована у межах аж трьох орографічних утворень: правобережна частина Києва розташована в межах Придніпровської височини (точніше Київського плато), північна - Поліської низовини, лівобережна – в межах Придніпровської низовини [37].

Найбільшу висоту, що сягає 197 – 198 м над рівнем моря, має територія у межах Печерського підняття (пл. Слави – 197,7 м та вул. Шовковична – 196,8 м). Враховуючи те, що рівень води у Дніпрі в межах міста становить близько 91,5 м, маємо, що перепад висот у Києві перевищує 100 м. Місто Київ відноситься до I кліматичного району (Північно – західний – Полісся, Лісостеп).

Значну відмінність висотного положення окремих частин міста спричинила доволі значну ерозію земної поверхні – передусім на правобережжі. Наслідком стало поширення ярів, яких налічується близько 50. Довжина найбільших ярів сягає 2-3 км, глибина 45-50 м. Найвідоміші яри – Бабин, Протасів, Реп'яхів, Звіринецький, Кмитів, Юрківський та ін. Чимало в місті й балок з дещо меншою крутістю схилів: Сирецька, Совська, Наводницька, Мишоловська.

Ґрунтовий покрив Києва є вельми строкатим, зважаючи на різноманітність природних умов. Північним околицям міста, що тяжіють до Полісся, властиві дерново-підзолисті ґрунти, сформовані переважно під хвойними лісами. На правобережній високій частині міста панують звичні для більшої частини України ґрунти – чорноземи. Утворились вони переважно на дуже своєрідних пухких, добре провітрюваних і відносно сухих суглинках – лесові відкладення. У природних київських лісопарках поширені темно – сірі лісові ґрунти, що утворились під пологом широколистяних лісів.

Місто Київ характеризувався помірно континентальним кліматом з теплим літом і м'якою зимою, оптимальною зволоженістю.

Глобальне потепління помітно змінило клімат Києва, особливо температурний режим. Порівняно з кліматичним періодом 1961–1990 рр., у 1991–2020 рр. середня температура зросла: січень потеплішав на 2,4°C, липень — на 2,0°C. Загалом середня температура літа підвищилася на 1,7°C, зими — на 1,5°C, весни — на 1,2°C, осені — на 0,7°C. Річна температура збільшилася на 1,3°C, досягнувши 9,0°C.

Кількість опадів зменшилася на 32 мм порівняно з попереднім періодом. Липень став сухішим на 20 мм, тоді як травень — вологішим на 12 мм. У сезонному розрізі літо стало посушливішим, а осінь — більш вологою.

Через потепління тривалість сезонів також змінилася: літо подовшало на 11 днів, а зима скоротилася на 13 днів.

Взимку у Києві формується сніговий покрив (у лютому 5–10 см, максимум — 66 см у 1970 р.). Сонячна радіація взимку становить близько 300

МДж/м², навесні — до 1500 МДж/м², влітку — до 1720 МДж/м², а восени знижується у 1,5–2 рази порівняно з весною [37].

Місто Київ є багатим на водні ресурси: існують значні запаси підземної води; окрім цього, великою є кількість поверхневих водних об'єктів: річок, озер, ставків.

Гідрографічна мережа району представлена р. Дніпро, річками його басейну (Десна, Либідь, Сирець, Борщагівка (Нивка), Горенка, Котурка, Віта, Любка, Коник), озерами, болотами, ставками і каналами.

Характерним для режиму всіх річок є виражена весняна повінь, низька літня межень, дещо підвищені рівні восени через сезонні дощі. Живлення річок змішане з переважаючим живленням ґрунтовими водами.

По функціональному використанню територія м. Києва розділяється на такі зони:

- житлову та громадську забудову;
- промислову;
- рекреаційну (лісові масиви, парки, сквери, зелені насадження загального користування, об'єкти природоохоронного фонду, водоймища).

Кожна із функціональних зон характеризується своїми особливостями, призначенням і впливом на навколишнє природне середовище [37].

3.2. Ґрунтовий покрив території дослідження

Ґрунтовий покрив Києва відзначається значною різноманітністю, що зумовлено поєднанням природних умов, характерних як для Полісся, так і для Лісостепу. На території міста сформувалися кілька основних типів ґрунтів, що різняться за складом, родючістю, вологістю та чутливістю до забруднення.

- Дерново-підзолисті ґрунти поширені переважно на північних околицях Києва, ближче до зони Полісся. Вони сформувалися під хвойними або змішаними лісами, тому мають кислу реакцію середовища (рН 4,5–5,5) і невеликий вміст гумусу (1–2%). Структура таких ґрунтів пухка, водопроникна, однак вони відносно бідні на поживні речовини

через вимивання сполук кальцію, магнію та заліза. Такі ґрунти характеризуються низькою буферною здатністю, тобто швидко реагують на зовнішні впливи, зокрема на забруднення важкими металами. Свинець, кадмій та цинк у них мають високу рухомість і легко переходять у ґрунтовий розчин, що збільшує ризик забруднення підземних вод.

– Чорноземи поширені на правобережній високій частині міста. Вони утворилися на лесових суглинках - добре аерованих, відносно сухих відкладеннях із високою вмістом мінералів. Чорноземи мають темний колір завдяки значній кількості гумусу (5–7%), добру структуру, високу вологоємність і насиченість поживними речовинами, такими як азот, фосфор і калій. Вони активно акумулюють важкі метали у верхньому гумусовому горизонті, особливо в умовах інтенсивного транспортного руху чи промислових викидів. Хоча органічна речовина частково зв'язує метали, за підвищеної кислотності або зміни вологості вони можуть ставати рухомими та доступними для рослин, що становить екологічну небезпеку.

– Темно-сірі лісові ґрунти поширені переважно у природних лісопаркових зонах Києва, наприклад, у Голосіївському лісі та Пущі-Водиці. Вони сформувалися під широколистяними лісами, де щороку накопичується велика кількість опалого листя. У процесі його розкладу утворюється гумус, який забезпечує середню родючість (3–4%) і сприятливу для рослин структуру. Їхня порівняно висока вологість і нейтральна реакція середовища створюють умови для хімічної мобілізації важких металів, особливо міді та цинку, які надходять із атмосферними опадами або поверхневим пилом від транспорту

Рівень важких металів у ґрунтах залежить від типу ґрунту, якості використовуваних добрив, наявності джерел забруднення. Попри високу родючість, ґрунти Києва досить вразливі до антропогенного навантаження, особливо до накопичення важких металів. Міське середовище, насичене

транспортом, промисловими підприємствами та побутовими джерелами забруднення, сприяє постійному надходженню до поверхневих шарів ґрунту таких токсичних елементів, як свинець (Pb), кадмій (Cd), мідь (Cu), цинк (Zn) та нікель (Ni). Важкі метали осідають переважно у верхніх 0–10 см ґрунту, що робить їх особливо небезпечними для рослин і ґрунтових мікроорганізмів. Наукові дослідження доводять, що сполуки металів є стійкими до біологічного розкладання, тому вони можуть зберігатися у ґрунті протягом десятиліть і виступати довготривалими джерелами вторинного забруднення [38, с. 18–23].

Найвищі концентрації важких металів спостерігаються в ґрунтах чорноземних груп. Дещо нижчі значення характерні для підзолистих ґрунтів, а найменші для дерново-підзолистих. Таким чином, вміст небезпечних важких металів пов'язаний з властивостями ґрунтів зберігати антропогенні сполуки, що корелює зі здатністю зв'язувати органічні добрива як критерій визначення родючості [38, с. 18–23].

Загалом, ґрунти Києва мають різну ступінь стійкості до хімічного навантаження. Дерново-підзолисті ґрунти є чутливими до важких металів через слабку буферну здатність. Чорноземи мають високий потенціал саморегуляції, проте при надмірному забрудненні теж стають джерелом вторинного розповсюдження токсикантів. Темно-сірі лісові ґрунти займають проміжне положення, утримуючи забруднювачі завдяки органічній речовині, але з ризиком їх подальшої міграції у водне середовище.

3.3. Джерела та сучасний стан забруднення ґрунтів важкими металами у Києві

Місто Київ має потужний промисловий комплекс різногалузевих підприємств, подекуди з не удосконаленими енерговитратними і ресурсовитратними технологіями без належної очистки викидів. Наприклад, лише у 2010 році 447 підприємств, установ та організацій міста здійснювали викиди забруднюючих речовин у повітряний басейн міста — близько 43,9 тис. т речовин [39].

Сьогодні в столиці України функціонують практично всі види міського транспорту, вплив яких на екологію міста є неоднаковим.

Джерелами забруднення ґрунтів важкими металами (ВМ) є промисловість, транспорт, теплові та атомні електростанції, мінеральні добрива. Сполуки важких металів вбираються коренями рослин і потрапляють у біомасу врожаю.

Джерела забруднення ґрунтів поділяють на декілька типів:

- 1) забруднення внаслідок промислової діяльності та будівельних робіт;
- 2) сміттєзвалища та переробка сміття;
- 3) забруднення автотранспортом [40].

Головним шляхом забруднення території є аерозолі промислових підприємств. Це забруднення повітряного басейну, головним чином, і визначає екологічний стан міського ландшафту. Найвищі концентрації важких металів фіксуються у безпосередній близькості від джерела емісії.

Джерела забруднення створюються також захороненням міського сміття в районах житлового будівництва. Це особливо характерно для південно-східної частини Києва, зокрема району Харківського масиву, де розташований сміттєспалювальний завод «Енергія». Характерними ознаками забруднення є велика кількість побутових відходів [41].

У відпрацьованих газах автомобілів, які працюють на бензині, містяться свинець, ванадій і кобальт; дизельні двигуни виділяють ванадій, мідь, нікель і хром. Вміст ВМ у відпрацьованих газах залежить від складу палива й сировини нафти.

Сучасні дослідження показують, що індекси техногенного навантаження в міських ґрунтах Києва продовжують залишатися високими. Наприклад, аналіз забруднення уздовж автодоріг Києва виявив середні коефіцієнти перевищення фонових значень для Pb = 4,83; Zn = 4,93; Hg = 2,67; Ni = 1,82; Cr = 1,33; Cu = 1,26 [42].

Водночас, дослідження з використанням магнітної сприйнятливості ґрунтів у міських зонах України показали високий кореляційний зв'язок між

магнітною сприйнятливістю та вмістом свинцю, цинку й міді. Це означає, що частинки техногенного походження (наприклад, від промислових викидів або транспортного пилу) активно накопичуються в верхніх горизонтах ґрунту [43, с. 30 -33].

Окрему увагу привертають сучасні дані щодо впливу масштабних антропогенних навантажень на ґрунти України. Зокрема, у регіонах, що зазнали військових дій, зафіксовано зростання концентрацій важких металів у кілька разів понад нормативні межі, що свідчить про здатність таких процесів впливати на фонові рівні навіть у віддалених регіонах, включно зі столицею [44, 18-27].

Це підтверджує той факт, що вхідні джерела забруднення в Києві - не лише класичні промисловість і транспорт, але й накопичення техногенного пилу, викидів з сучасних технологічних процесів, а також вплив урбаністичного середовища (будівництво, дорожнє покриття, будівельні відходи) створюють багаторівневу проблему. Основні забруднюючі підприємства м. Київ показано на рисунку 3.1.

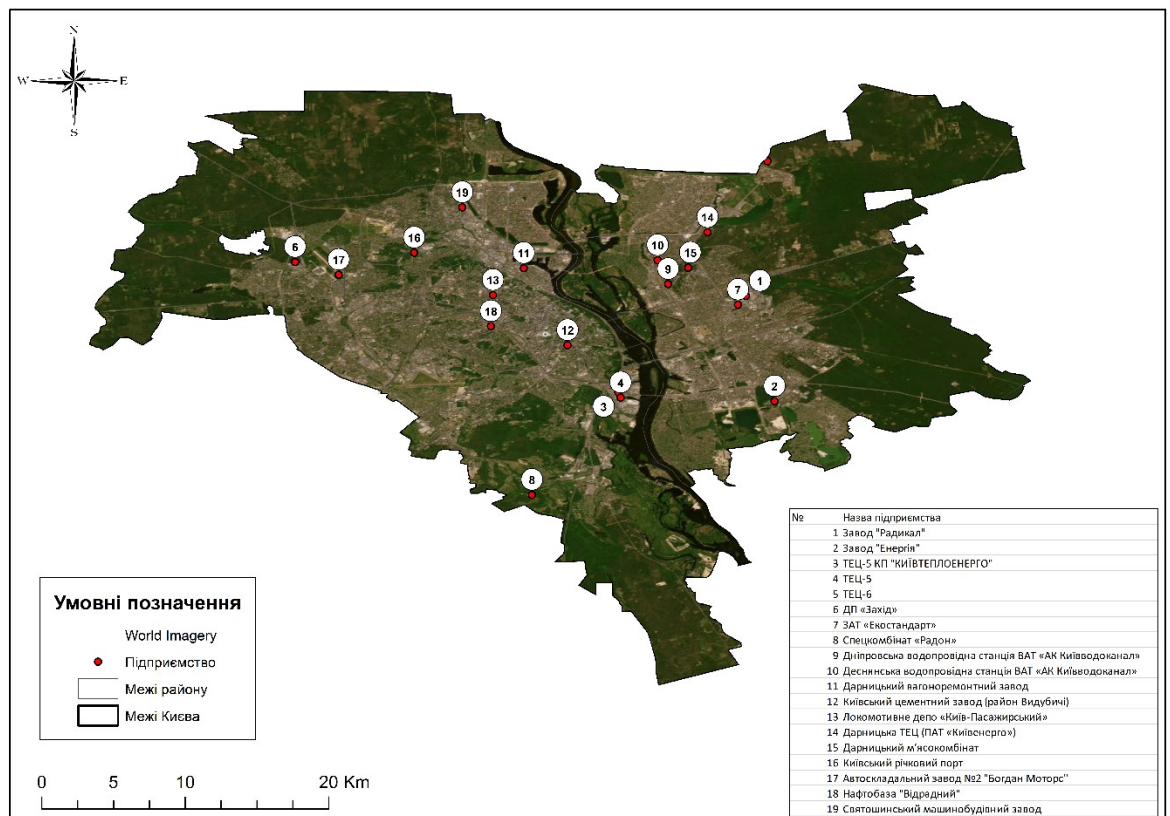


Рис. 3.1 – Забруднюючі підприємства м. Київ (розроблено автором у середовищі ArcMap)

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ, ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

4.1. Просторовий розподіл важких металів та ідентифікація зон підвищеного екологічного ризику

Оцінка просторового розподілу важких металів у міських ґрунтах є ключовим етапом екологічного моніторингу, оскільки дозволяє виявити локальні ділянки підвищеного забруднення та потенційно небезпечні для здоров'я людей і довкілля. В умовах міського середовища концентрації металів часто мають нерівномірний характер, що обумовлено впливом промислових підприємств, транспортної інфраструктури, теплових станцій та інших локальних джерел.

Попередньо отримані аналітичні дані лягли в основу карт, які відображають просторовий розподіл вмісту важких металів (Pb, Cu, Zn, As, Cr) в ґрунтах м. Києва. На рис. 4.1 наведено карту розподілу вмісту Pb. Високі значення 160-230 мг/кг приурочені до районів з інтенсивним рухом автотранспорту (проспект Правди, бульвар Лесі Українки, бульвар Вацлава Гавела, проспект В. Маяковського), до промислових об'єктів (ТЕЦ, завод «Радикал» та «Енергія»). Порівняно низькі значення 40-70 мг/кг зафіксовано в парках: «Нива», «Совки», Голосіївському парку імені Максима Рильського.

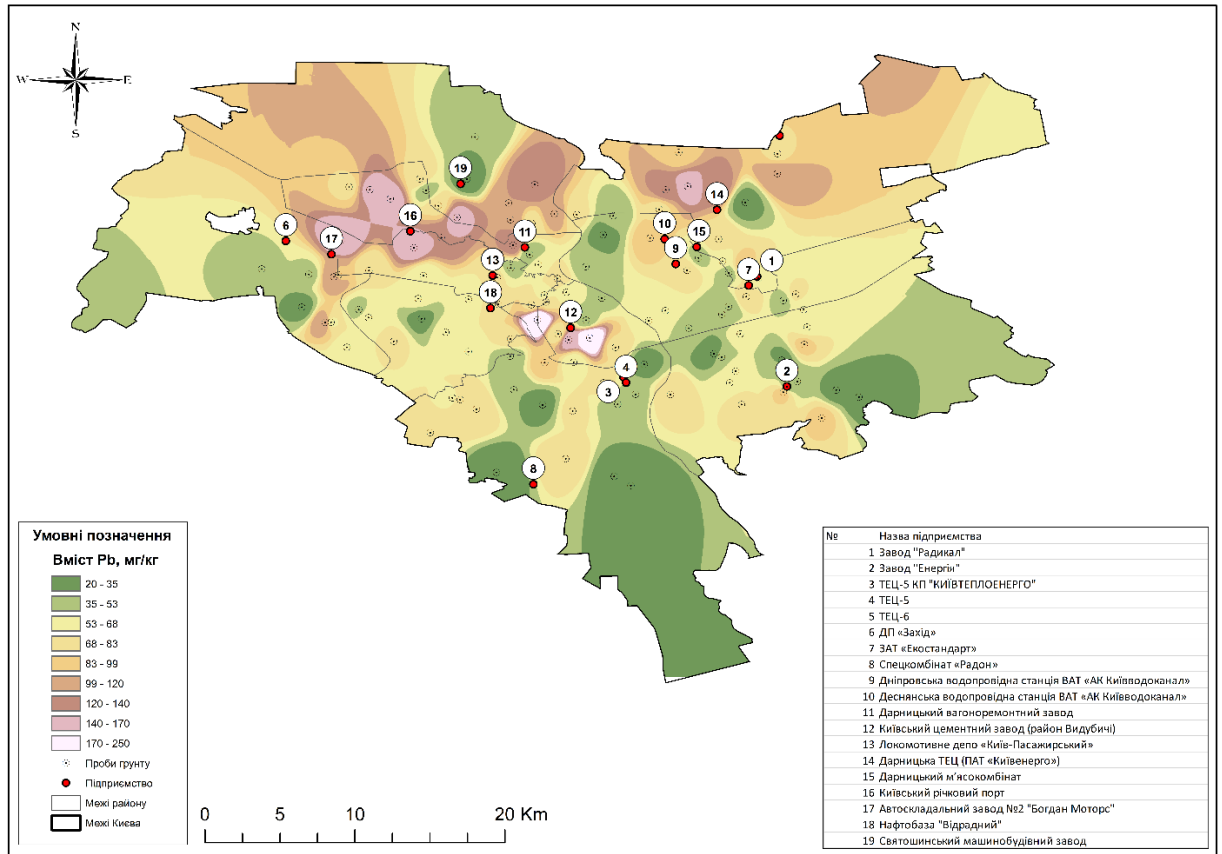


Рис. 4.1 - Карта розподілу вмісту Рв у ґрунтах м. Києва

Купрум може потрапляти у ґрунт з різних джерел, таких як відходи промисловості, забруднена атмосфера, зношені металеві конструкції та інше. На рис 4.2, ми бачимо, що досить високі значення спостерігаються на Лівобережжі, біля ТЕЦ-6, північно-східній околиці Києва у нинішньому Деснянському районі. А відповідно мінімальні значення – у Дніпровському, Шевченківському районах, в західній частині Києва.

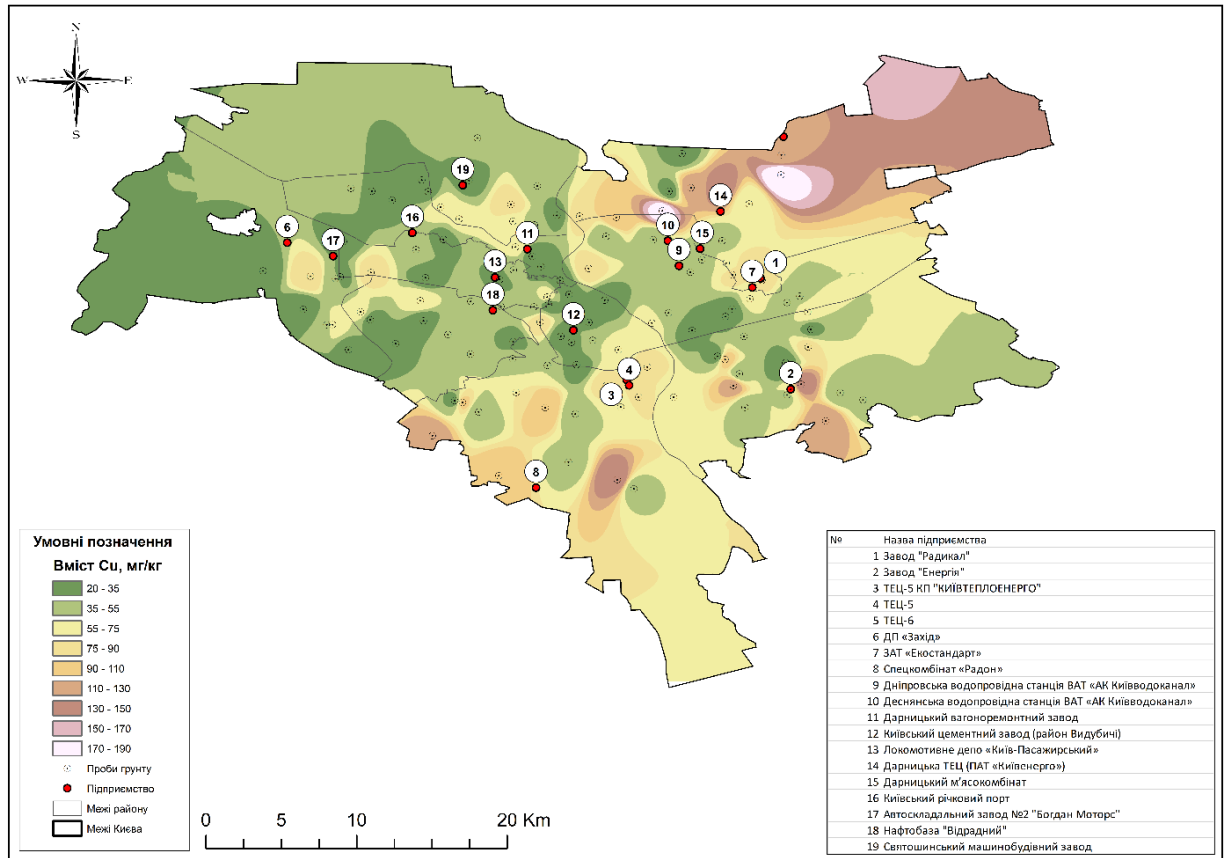


Рис. 4.2 - Карта розподілу вмісту Cu у ґрунтах м. Києва

Забруднення ґрунтів цинком може мати шкідливий вплив на навколишнє середовище, та здоров'я людей і тварин. Причини забруднення ґрунту цинком можуть бути різними, такими, як використання пестицидів, промислових викидів, стічних вод, а також поверхневих стоків з місць, де відбувається зварювання та обробка металів. Критичні значення спостерігаються біля ТЕЦ-5, заводу «Енергія» та заводу «Радикал». Мінімальні значення у Святошинському та Голосіївському районах (рис. 4.3).

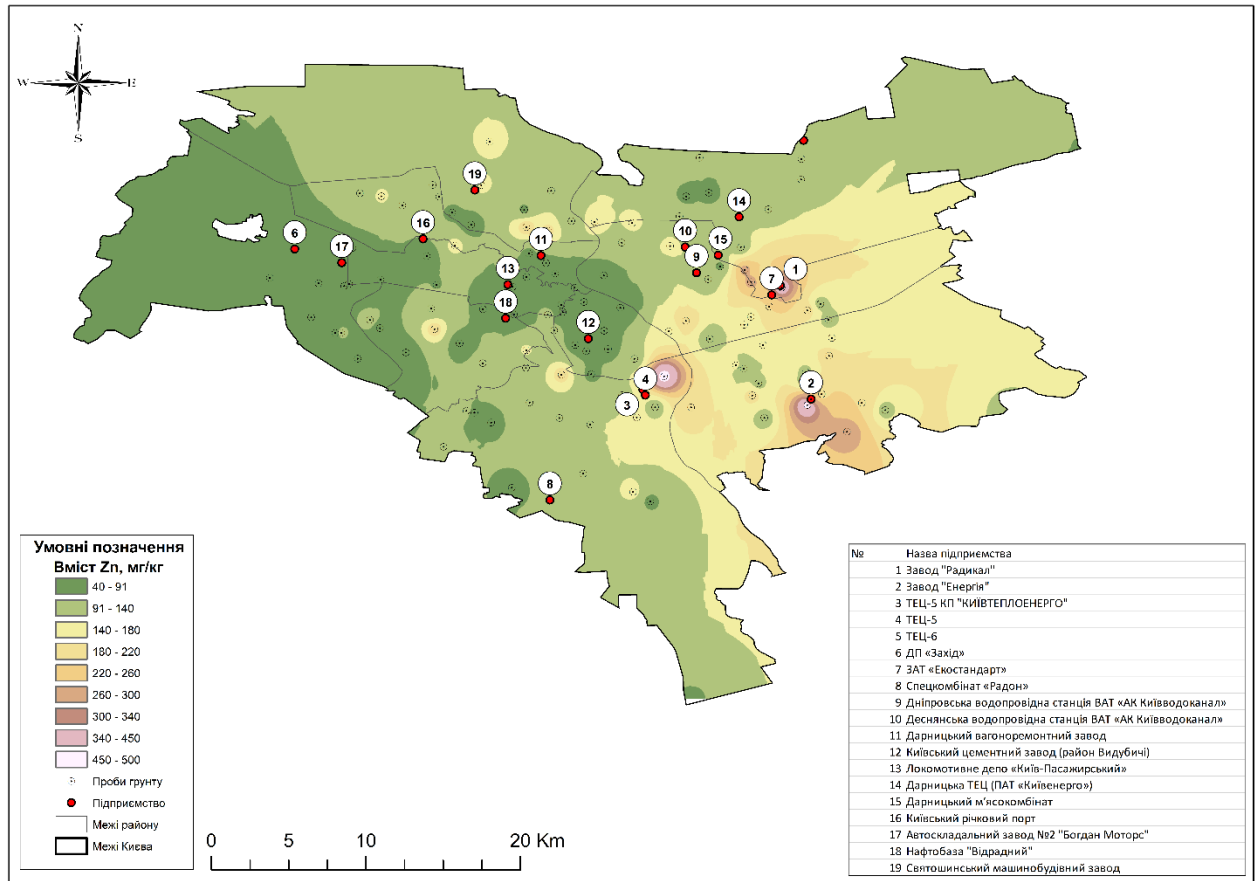


Рис. 4.3 - Карта розподілу вмісту Zn у ґрунтах м. Києва

З карти видно, що підвищені концентрації арсену спостерігаються переважно на сході міста, зокрема в районі підприємства Спецкомбінат "Радон" (№7). У цій зоні рівень забруднення сягає найвищих показників від 11 до 25 мг/кг. Натомість мінімальні значення вмісту арсену (0,5–2 мг/кг) зафіксовані переважно у західній частині Києва, а також у південних і північних районах міста, де переважають світло-зелені відтінки на карті (рис. 4.4).

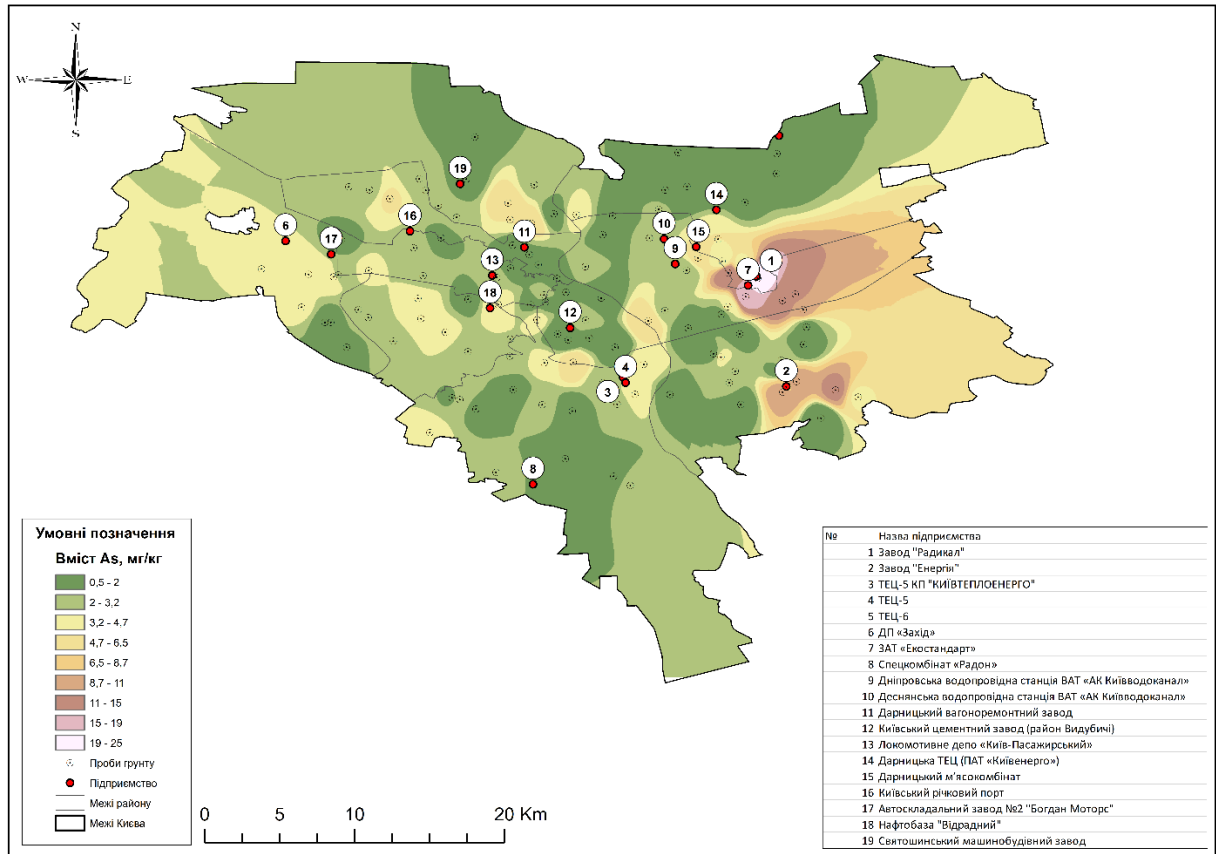


Рис. 4.4 - Карта розподілу вмісту As у ґрунтах м. Києва

На рисунку показано просторовий розподіл вмісту хрому (Cr) у ґрунтах м. Києва (рис. 4.5). Як видно з карти, підвищені концентрації хрому спостерігаються переважно у лівобережній частині міста, зокрема в районі Спецкомбінату "Радон" (№7). У цих зонах рівень забруднення сягає від 271 до 400 мг/кг, що позначено відтінками жовто-коричневого та червонуватого кольору. Найнижчі значення (30–70 мг/кг) фіксуються у західній та південній частинах Києва, де переважають темно-зелені відтінки на карті. Це території, віддалені від великих промислових об'єктів, зокрема Святошинського, Голосіївського та частково Оболонського районів.

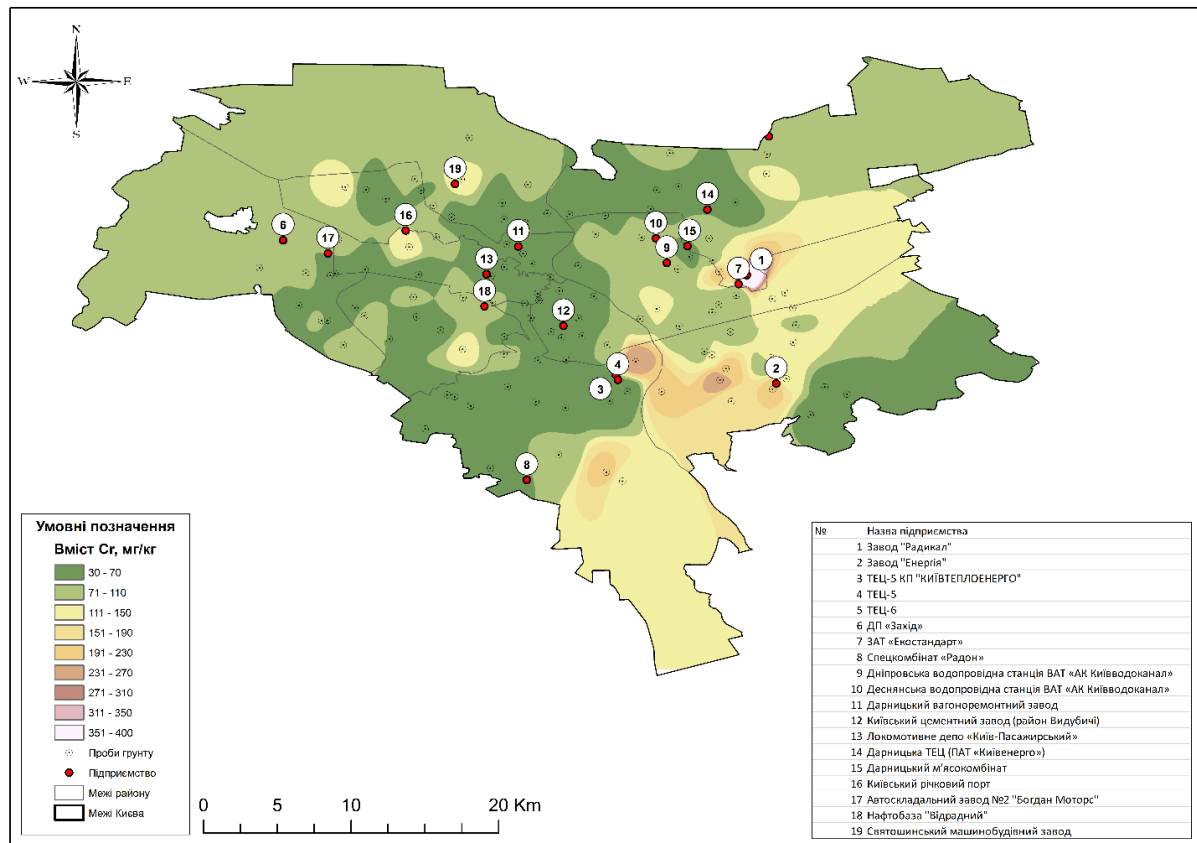


Рис. 4.5 - Карта розподілу вмісту Сr у ґрунтах м. Києва

4.2. Аналіз поширення важких металів, порівняння з гранично допустимими концентраціями та екологічна оцінка стану ґрунтів міста

На основі побудованих карт просторового розподілу вмісту важких металів (Pb, Cu, Zn, As, Cr) у ґрунтах м. Києва встановлено чітку залежність рівня забруднення від розташування основних джерел техногенного навантаження — промислових підприємств, теплоелектроцентралей (ТЕЦ) та інтенсивних транспортних магістралей.

Свинцем (Pb) найбільше забруднені ділянки, що прилягають до районів з інтенсивним автомобільним рухом (проспект Правди, бульвар Лесі Українки, бульвар Вацлава Гавела, проспект Маяковського) та до промислових об'єктів — ТЕЦ, заводів «Радикал» і «Енергія». Вміст Pb у цих зонах сягає 160–230 мг/кг, що наближається до або перевищує гранично допустиму концентрацію (ГДК) для урбанізованих ґрунтів (160 мг/кг). Мінімальні значення (40–70 мг/кг) зафіксовані у зелених зонах, зокрема в парках «Нива», «Совки», Голосіївському

парку імені Максима Рильського, що свідчить про ефективну роль рослинного покриву у зменшенні забруднення.

Купрум (Cu) потрапляє у ґрунт внаслідок діяльності промислових підприємств, атмосферних викидів та зношення металевих конструкцій. Найвищі концентрації Cu виявлені у лівобережній частині Києва, поблизу ТЕЦ-6 та Деснянського району, що зумовлено наявністю енергетичних і машинобудівних об'єктів. У центральній та західній частинах міста (Шевченківський, Дніпровський райони) вміст Cu значно нижчий, що пояснюється відсутністю значних джерел викидів і кращими природними умовами самоочищення ґрунтів.

Цинк (Zn) має подібну тенденцію до накопичення. Найбільші концентрації (понад 250 мг/кг) зафіксовані поблизу ТЕЦ-5, заводів «Енергія» та «Радикал», що пояснюється промисловими та транспортними викидами, використанням металевих сплавів і стічних вод. Мінімальні показники (70–100 мг/кг) властиві Святошинському та Голосіївському районам, які мають високу частку зелених насаджень.

Вміст арсену (As) у ґрунтах є підвищеним у східній частині міста, поблизу спецкомбінату «Радон» та заводу «Енергія», де значення сягають 15–25 мг/кг, що перевищує ГДК (2 мг/кг) у декілька разів. У західній частині Києва (Святошинський, Голосіївський райони) концентрації арсену не перевищують 2 мг/кг, тобто відповідають природному фоновому рівню.

Хром (Cr) демонструє аналогічну закономірність: підвищені концентрації (до 310 мг/кг) фіксуються у лівобережній промисловій зоні (поблизу спецкомбінату «Радон» і заводу «Енергія»), тоді як у західних і південних районах міста рівень Cr становить лише 30–70 мг/кг, що є нижчим за ГДК (100 мг/кг).

Порівняння з гранично допустимими концентраціями свідчить, що у більшості районів Києва рівень вмісту важких металів не перевищує нормативів, проте в східних і південно-східних частинах міста спостерігаються локальні перевищення, зокрема для арсену, свинцю та хрому.

Загалом екологічна оцінка стану ґрунтів Києва показує, що територія міста характеризується помірним рівнем техногенного забруднення. Основними чинниками формування високих концентрацій є промислові викиди, транспорт, енергетичні об'єкти та накопичення відходів виробництва. Найбільш несприятлива ситуація спостерігається на лівобережжі, тоді як західна частина міста має відносно чисті ґрунти (рис. 4.6).

Для покращення екологічного стану міських ґрунтів доцільно проводити регулярний моніторинг, здійснювати рекультивацію забруднених територій, розширювати зелені насадження та впроваджувати природоохоронні технології на підприємствах, що є потенційними джерелами забруднення.

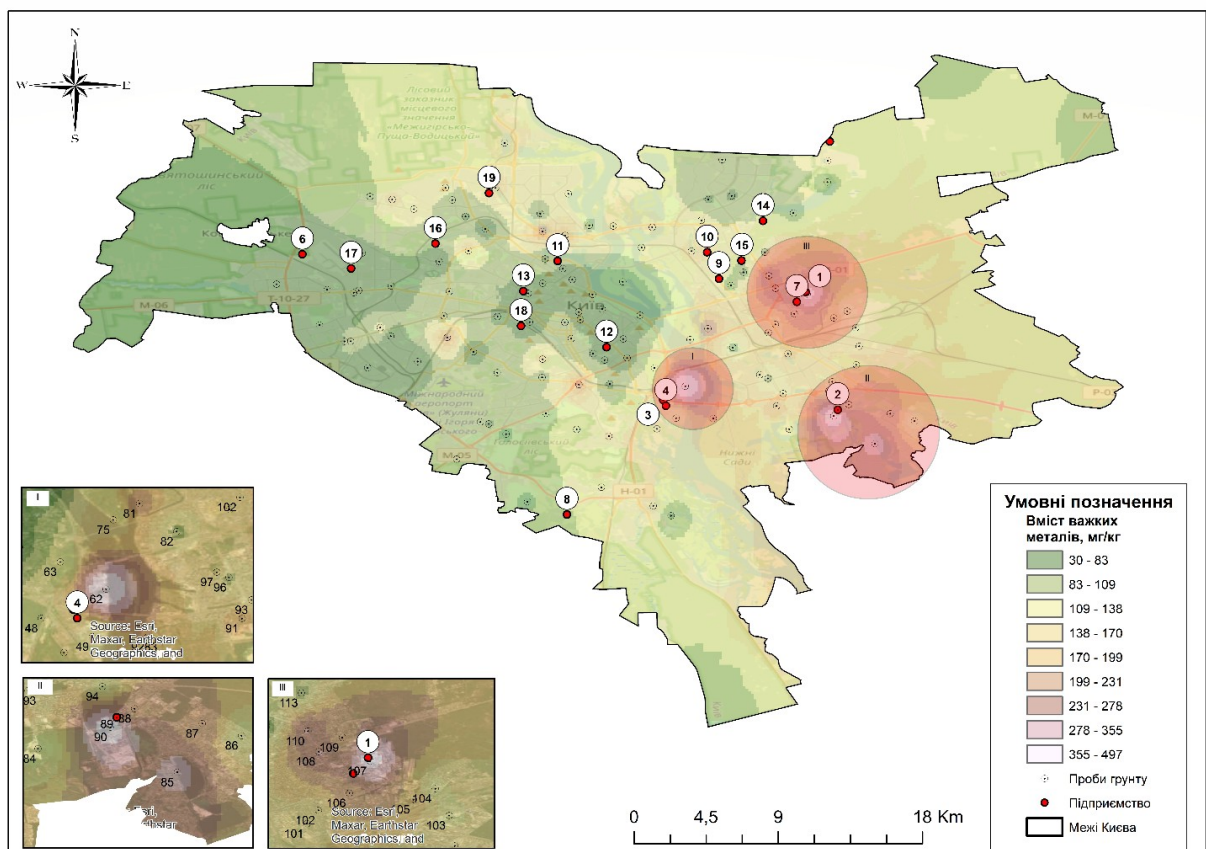


Рис. 4.6 - Карта розподілу вмісту важких металів у м. Київ

4.3. Рекомендації щодо мінімізації забруднення та рекультивації ґрунтів

На основі просторового аналізу концентрацій важких металів у ґрунтах м. Києва, відображених на карті (рис. 4.7), можна побачити реальний їх стан,

спрогнозувати масштаби поширення зон техногенного впливу та сформулювати рекомендації, що враховують реальні території.

Перша рекомендація це зменшення промислових викидів у локальних зонах підвищеної концентрації (виділенні на карті). Картографічні дані свідчать про осередки значного забруднення у східних районах міста, та на березі Дніпра (район промзони Дарниці, Лівобережжя, ТЕЦ-5). Саме в цих зонах рекомендується:

- посилити екологічний контроль за підприємствами, що розташовані в ареалах з максимальними;
- удосконалити технологічні процеси очищення газових викидів та стічних вод, впроваджуючи сучасні фільтраційні системи та сорбційні матеріали;
- провести інвентаризацію можливих несанкціонованих джерел забруднення.

Друга рекомендація це мінімізація транспортного забруднення в зонах інтенсивного руху. Найвищі концентрації металів уздовж транспортних коридорів Києва (зокрема, на Лівому березі та частково біля центральних магістралей) вказують на необхідність:

- розгортання зелених буферних насаджень уздовж магістралей, де концентрації переходять у діапазони $> 138\text{--}170$ мг/кг;
- переорієнтації транспортних потоків у районах із зафіксованими локальними перевищеннями ГДК.

Третя рекомендація це рекультивація ділянок з максимальним техногенним навантаженням. Згідно з картою, найвищі концентрації (понад $278\text{--}355$ мг/кг та $355\text{--}497$ мг/кг) спостерігаються локально біля окремих промислових підприємств, для таких ділянок доцільно:

- здійснити технічну рекультивацію;
- застосувати фіторе mediaцію у місцях середнього забруднення;
- створити попереджувальні зони обмеження будівництва або рекреаційної діяльності в ділянках із концентраціями понад 300 мг/кг.

Четверта рекомендація це Розвиток системи екологічного моніторингу

- Створити єдину базу даних екологічного стану ґрунтів Києва з регулярним оновленням інформації про рівень вмісту важких металів.
- Здійснювати періодичні лабораторні дослідження у зонах техногенного навантаження:
 1. східні промзони (Дарницький, Дніпровський райони), території з найбільшим техногенним впливом;
 2. території поблизу підприємств, де навколо точок забруднення сформувалися радіальні зони підвищеної концентрації;
 3. центральна частина Києва, де спостерігаються середні рівні забруднення;
 4. ділянки, що знаходяться в діапазоні 231–355 мг/кг, як потенційні точки для встановлення додаткових станцій моніторингу.
- Рекомендується створити ГІС-базу, яка автоматично оновлюватиме показники та дозволить прогнозувати зміни у забрудненні за допомогою моделювання просторового поширення металів.

У результаті реалізації зазначених заходів можна очікувати зменшення концентрацій важких металів у ґрунтах, покращення екологічної безпеки міського середовища та створення сприятливих умов для сталого розвитку Києва.

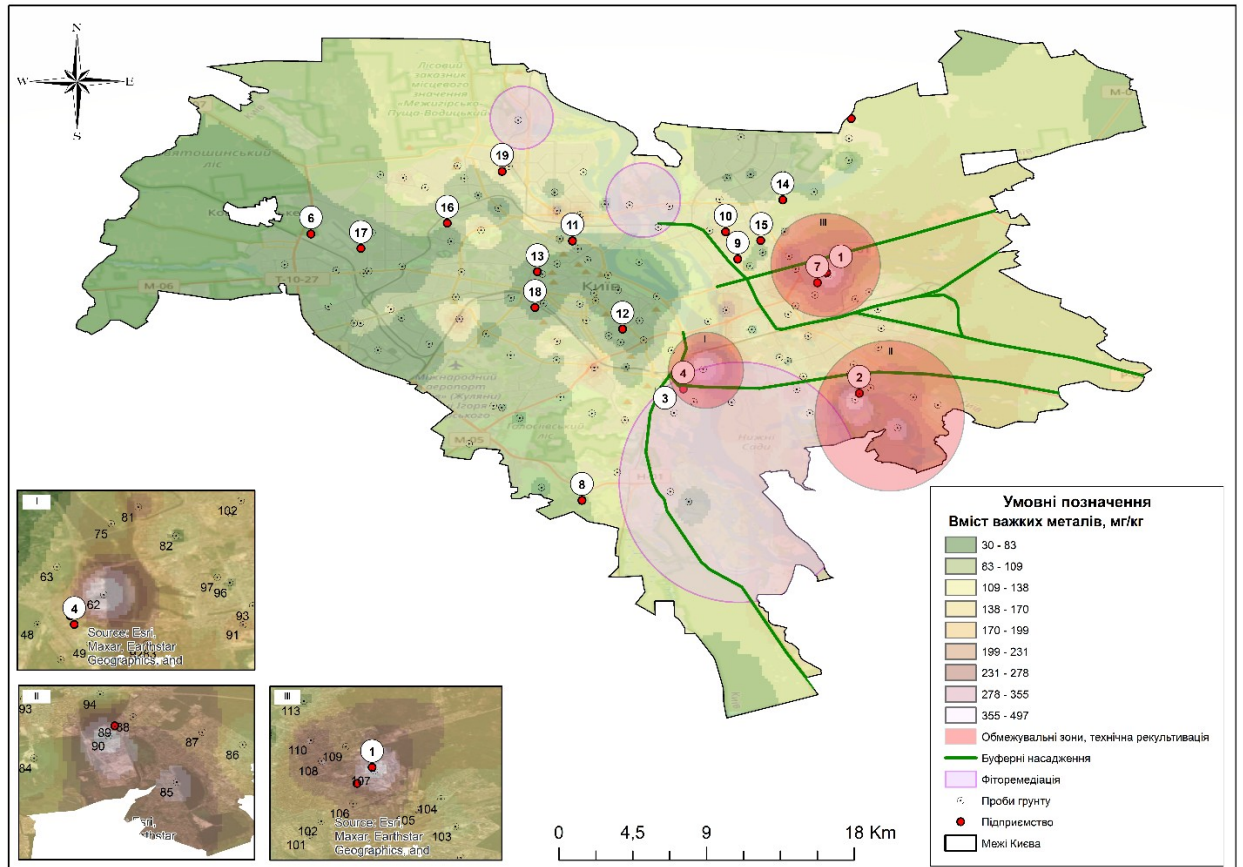


Рис. 4.7 - Карта рекомендацій щодо мінімізації забруднення ґрунтів м. Київ

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської роботи було проведено комплексне дослідження просторового розподілу важких металів у ґрунтах м. Києва з використанням сучасних методів математичної статистики та геоінформаційних технологій. Отримані результати дозволили оцінити рівень техногенного навантаження на міське середовище, визначити джерела надходження забруднюючих речовин і виявити просторові закономірності формування зон екологічного ризику. Розв'язання поставлених завдань забезпечило досягнення мети дослідження та підтвердило актуальність проблеми забруднення міських ґрунтів важкими металами. Відповідно до поставлених завдань було отримано такі результати.

Першим етапом роботи був аналіз наукової літератури, що дав змогу систематизувати сучасні уявлення про джерела, масштаби та механізми накопичення важких металів у ґрунтах урбанізованих територій. Встановлено, що міські ґрунти є високочутливими до техногенного навантаження, оскільки постійно зазнають впливу транспорту, промисловості, будівництва та інших антропогенних процесів. Систематизація літературних даних дозволила визначити основні проблемні аспекти дослідження, зокрема концентрацію Pb, Zn, Cu, Cd, Ni та Cr у межах великих міст, та сформувані теоретичну базу для подальшого аналізу.

Другим важливим завданням було проведення моніторингу стану ґрунтів м. Києва та визначення основних джерел техногенного впливу. Використані дані Управління екології та природних ресурсів КМДА за 2021 рік дозволили отримати достовірну інформацію про вміст важких металів у ґрунті. Аналіз просторового поширення металів показав нерівномірний характер техногенного навантаження: найвищі концентрації фіксуються поблизу магістралей із високою інтенсивністю транспортних потоків, промислових зон, складських територій.

Після збору даних проведено їх детальну статистичну обробку. Було розраховано коефіцієнти концентрації (Kc), індекси забруднення (Zc), виконано оцінку варіабельності та кореляційний аналіз. Отримані статистичні параметри засвідчили, що для окремих територій характерні рівні забруднення, які перевищують фонові значення, а подекуди наближаються до екологічно небезпечних. Особливо це стосується вмісту свинцю, який найбільш чутливо реагує на транспортні навантаження, та цинку, пов'язаного із зносом автомобільних шин і металевих конструкцій.

Важливим етапом дослідження стало створення ГІС-бази даних, яка включає інформацію про пункти відбору ґрунтових проб, концентрації важких металів і розташування потенційних джерел забруднення. Побудована ГІС-система забезпечила інтеграцію просторових і аналітичних даних, що дозволило організувати ефективне картографічне представлення результатів та полегшило подальше моделювання.

За допомогою інтерполяційних методів IDW та Kriging створено картографічні моделі просторового розподілу концентрацій важких металів. Метод Kriging виявився більш точним завдяки врахуванню просторової автокореляції. Інтерполяційні карти показали, що найбільш забруднені зони зосереджені поблизу інтенсивних транспортних потоків, магістралей, промислових районів.

На основі отриманих результатів сформульовано, щодо зниження техногенного впливу на міські ґрунти. Вони охоплюють удосконалення транспортної інфраструктури з метою зниження вихлопних викидів, посилення контролю за промисловими підприємствами, збільшення площі зелених насаджень та впровадження фіторе mediaційних заходів на забруднених ділянках. Окремо підкреслено доцільність систематичного екологічного моніторингу з використанням ГІС-технологій для оперативного відстеження динаміки забруднення.

Результати дослідження підтверджують, що інтеграція традиційних методів аналізу ґрунтів із сучасними інструментами ГІС та просторової статистики дозволяє значно підвищити якість та інформативність дослідження стану міських екосистем. Створена ГІС-база та отримані картографічні моделі можуть бути використані органами місцевого самоврядування, установами екологічного контролю та науково-дослідними організаціями для підвищення ефективності екологічного моніторингу, оптимізації природоохоронних заходів та планування сталого розвитку Києва. Робота має важливе значення для подальшого розвитку системи екомоніторингу міста Києва та формування стратегії збалансованого управління міськими ґрунтами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мислива Т. М., Онопрієнко Л. О. Важкі метали в урбандшафтах і фітоценозах та території м. житомира. *Вісник ХНАУ*. 2009. Т. 1. С. 89–95.
2. Словник – довідник з екології / уклад.: О. Лановенко, О. Остапішина. Херсон : ПП Вишем. В.С., 2013. 226 с.
3. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин : Постанова Каб. Міністрів України від 15.12.2021 № 1325.
URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-п#Text>
4. Advances in studies on heavy metals in urban soil: a bibliometric analysis / S. Tang та ін. *Sustainability*. 2024. Т. 16, № 2. С. 860.
URL: <https://doi.org/10.3390/su16020860>
5. Wei B., Yang L. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Science of the total environment*. 2010. Т. 408, № 2. С. 305–316.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.021>
6. The impact of proximity to road traffic on heavy metal accumulation and enzyme activity in urban soils and dandelion / A. Bartkowiak та ін. *Sustainability*. 2024. Т. 16, № 2. С. 812. URL: <https://doi.org/10.3390/su16020812>
7. Дослідження вмісту важких металів у ґрунті на прилеглих територіях автозаправних станцій / О. G. Chaika та ін. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2018. Т. 28, № 10. С. 62–65. URL: <https://doi.org/10.15421/40281013>
8. Contamination of soils with heavy metals in the urban ecosystem of the city of rivne / V. Melnyk та ін. *Ecological engineering & environmental technology*. 2022. Т. 23, № 6. С. 61–69. URL: <https://doi.org/10.12912/27197050/152909>

9. The distribution of heavy metal forms in the industrial-urban agglomeration soil / V. Smyrnov та ін. *Journal of ecological engineering*. 2023. Т. 24, № 11. С. 303–313. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/171774>
10. Кармазиненко С.П., Кураєва І.В., Самчук А.І., Войтюк Ю.Ю., Манічев В.Й. Важкі метали у компонентах навколишнього середовища м. Маріуполь (еколого-геохімічні аспекти). *К.: Інтерсервіс*, 2014. С. 203
11. A global meta-analysis reveals effects of heavy metals on soil microorganisms / D. Li та ін. *Journal of hazardous materials*. 2025. Т. 491. С. 1380. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.138018>
12. Plant–Microbe interactions under the action of heavy metals and under the conditions of flooding / E. A. Gladkov та ін. *Diversity*. 2023. Т. 15, № 2. С. 175. URL: <https://doi.org/10.3390/d15020175> (дата звернення: 10.12.2025).
13. Вплив забруднення ґрунтів свинцем на фізико-хімічні властивості чорнозему вилуженого лісо-лучного в умовах Західного Лісостепу України / Н. Качмар та ін. *Bulletin of Iviv national environmental university: agronomy*. 2023. № 27. С. 52–57. URL: <https://doi.org/10.31734/agronomy2023.27.052>
14. Impact of dumpsite compost on heavy metal accumulation in some cultivated plants / B. T. Abd-Elhalim та ін. *BMC research notes*. 2025. Т. 18, № 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s13104-025-07083-9>
15. Evaluation of soil heavy metal(loid)s contamination and its impact on food safety in the suburbs of an industrial city, Henan Province, China / L. Shi та ін. *Discover applied sciences*. 2025. Т. 7, № 3. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06639-5>
16. Bioaccumulation of heavy metals in a soil–plant system from an open dumpsite and the associated health risks through multiple routes / M. Sabir та ін. *Sustainability*. 2022. Т. 14, № 20. С. 132. URL: <https://doi.org/10.3390/su142013223>

17. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: ecological risks and human health implications / A. Alengebawy та ін. *Toxics*. 2021. Т. 9, № 3. С. 42. URL: <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
18. Microbial diversity and community assembly in heavy metal-contaminated soils: insights from selenium-impacted mining areas / Z. Wang та ін. *Frontiers in microbiology*. 2025. Т. 16. URL: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1561678>
19. Effect of heavy metals pollution on soil microbial diversity and bermudagrass genetic variation / Y. Xie та ін. *Frontiers in plant science*. 2016. Т. 7. URL: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00755>
20. Sytar O., Taran N. Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine – a review. *Journal of central european agriculture*. 2022. Т. 23, № 4. С. 881–887. URL: <https://doi.org/10.5513/jcea01/23.4.3603>
21. Krainiuk O. V., Buts Y. V., Barbashyn V. V. Environmental consequences of military operations in ukraine on the example of the kharkiv region. *THEORETICAL AND APPLIED ASPECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF UKRAINIAN REGIONS. volume 1*. 2025. С. 275–299. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-539-6-12>
22. Assessing heavy-metal contamination and sources by GIS-based approach and multivariate analysis of urban–rural topsoils in Wuhan, central China / M. Gong та ін. *Environmental geochemistry and health*. 2009. Т. 32, № 1. С. 59–72. URL: <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9265-2>
23. Enrichment, sources and ecological risk mapping of heavy metals in agricultural soils of dhaka district employing SOM, PMF and GIS methods / M. A. Hossain Bhuiyan та ін. *Chemosphere*. 2021. Т. 263. С. 128–339. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128339>

24. Monitoring heavy metals and metalloids in soils and vegetation by remote sensing: a review / V. Lovynska та ін. *Remote sensing*. 2024. Т. 16, № 17. С. 3221. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16173221>
25. Retrieval and mapping of heavy metal concentration in soil using time series landsat 8 imagery / Y. Fang та ін. *ISPRS - international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. 2018. Т. XLII-3. С. 335–340. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-335-2018>
26. Alharbi T., El-Sorogy A. S., Rikan N. A GIS and multivariate analysis approach for mapping heavy metals and metalloids contamination in landfills: a case study from al-kharj, saudi arabia. *Land*. 2025. Т. 14, № 8. С. 1697. URL: <https://doi.org/10.3390/land14081697>
27. Mapping of heavy metal contamination of soil cover in rivne as a component of GIS ecological monitoring / B. Siaska та ін. *17th international conference monitoring of geological processes and ecological condition of the environment*, м. Kyiv, Ukraine,. 2023. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520214>
28. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України № 2059-VIII від 23 трав. 2017 р. Верховна Рада України. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>
29. Directive 2011/92/EU of the European Parliament and of the Council on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. *Official Journal of the European Union*. 2011.
30. World Health Organization. *Preventing disease through healthy environments: Exposure to cadmium: A major public health concern*. Geneva : WHO Press, 2010.
31. European Environment Agency. *Soil pollution: A hidden reality*. Copenhagen : EEA, 2020. EEA Report № 19

32. Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення : керівний нормативний документ / за ред. І. П. Яцука, С. А. Балюка. 2-ге вид., допов. Київ, 2019. 108 с.
33. ДСТУ ISO 10381-1:2007. Ґрунти. Відбір проб. Частина 1. Основні положення. – Київ: ДП “УкрНДНЦ”, 2007. – 24 с.
34. Abdallah D. O., Bashir K. Quantitative determination of heavy metals in water using ICP-MS. *International journal of advanced chemistry research*. 2023. T. 5, № 1. С. 115–116. URL: <https://doi.org/10.33545/26646781.2023.v5.i1b.192>
35. Biogeographic distribution patterns and assembly processes of *nirS*-type and *nirK*-type denitrifiers across the black soil zone in Northeast China / Х. Ну та ін. *Soil science society of america journal*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1002/saj2.20345>
36. Ecological assessment of heavy metal content in ukrainian soils / О. Datsko та ін. *Journal of ecological engineering*. 2024. T. 25, № 11. С. 100–108. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/192669>
37. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Екологічні паспорти [Електронний ресурс]. 2024. Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichni-pasporty/>
38. On the issue of determining the background level of soil pollution with heavy metals when determining the impact of military actions / І. О. Chernychenko та ін. *Environment & health*. 2025. № 1 (114). С. 18–23. URL: <https://doi.org/10.32402/dovkil2025.01.018>
39. Статистичний щорічник міста Києва за 2010 рік / Головне управління статистики у м. Києві. Київ: *Державна служба статистики України*, 2011. С. 344
40. Ігнатенко М. Г., Макеев В. О. Екологія і економіка природокористування : навч. посіб. Київ–Херсон: *Айлант*, 2002. С. 287

41. Самчук А. І., Кураєва І. В., Єгоров О. С. Важкі метали у ґрунтах Українського Полісся та Київського мегаполісу. Київ : *Наук. думка*, 2006. С. 108
42. Геологічна будова та корисні копалини України : зб. матеріалів Всеукр. молодіжної наук. конф. (Київ, 2 жовт. 2023 р.) / НАН України, Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка. Київ, 2023. 67 с.
43. Menshov O. Magnetic susceptibility and heavy metals soil accumulation in ukrainian urban areas. *Вісник київського національного університету імені тараса шевченка. геологія*. 2025. Т. 4, № 63. С. 30–33.
44. Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine / L. Yashchenko та ін. *European journal of environmental sciences*. 2025. Т. 15, № 1. С. 18–27. URL: <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>