

© І.В. Віршило, К.М. Бондар, 2009

УДК 550.832+634.12

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
м. Київ*

ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ІНДУСТРІАЛЬНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ПІВНІЧНОЇ АСТУРІЇ (ІСПАНІЯ) ЗА ДАНИМИ ПЕТРОМАГНІТНИХ І ГЕОХІМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вступ. Погіршення екологічного стану протягом ХХ століття, зумовлене швидкими темпами індустріального розвитку і недостатньою увагою до проблем охорони навколишнього середовища змусило людство шукати нових методів і технологій оцінки забрудненості і моніторингу стану довкілля. Одним з найдешевших і експресних у світі визнаний магнітний метод [1–5]. В основі його лежить явище підвищення або пониження магнітної сприйнятливості й інших магнітних характеристик природного ґрунту внаслідок випадіння на його поверхню дрібнодисперсного техногенного пилу. Серед техногенних процесів, що супроводжуються потужними викидами в атмосферу феримагнітного матеріалу, найнебезпечнішими є видобуток залізних руд, металургійне виробництво, спалювання вугілля на теплових електростанціях, виробництво цементу [6].

У нашій роботі представлені результати проведених в індустріальному районі Астурії (Іспанія) петромагнітних і геохімічних досліджень ґрунтового покриву, узагальнені у геоінформаційній моделі території.

Постановка проблеми. В зоні індустріального впливу ґрунти насичуються техногенними феримагнетиками і набувають характерних петромагнітних ознак. Самі по собі оксиди й гідроксиди заліза нетоксичні, однак вони можуть сорбувати на своїй поверхні важкі метали [7], надмірна концентрація яких у ґрунті спричиняє числені шкідливі наслідки. Тому комплексування геохімічних і магнітних методів під час екологічних досліджень необхідне для надійного виділення зон підвищення магнітної сприйнятливості ґрунтового покриву, утворених внаслідок інтенсивного осадження аеротехногенного пилу. Такий підхід дозволяє розглядати магнітні властивості ґрунтів як функцію відстані пунктів спостережень від джерел забруднення.

Слід мати на увазі, що аномальний магнітний ефект забруднених ґрунтів проявляється на тлі природних процесів накопичення і перетворення магнітних мінералів [8, 9]. Отже, врахування природних і техногенних умов існування ґрунтового покриву доцільно втілити у комплексній гео-

інформаційної моделі, до якої входила б геофізична, геохімічна, геологічна, геоморфологічна, ландшафтна інформація про територію досліджень. Математико-картографічне моделювання (наприклад, [10]), реалізоване на базі ГІС, може бути успішно використане для картування площинного розповсюдження різних типів ґрунтів, мінливості їх фізичних та хімічних властивостей, встановлення їх зв'язку з природними і техногенними чинниками. В такий спосіб можливо прослідкувати закономірності розповсюдження забруднення на значних площах керуючись даними точкових (але репрезентативних!) спостережень.

Територія дослідження має розміри $\sim 23 \times 21$ км, охоплює північну частину провінції Астурія (Іспанія) у передгір'ї Кантабрійських гір (рис. 1). З півночі вона обмежена нерівною береговою лінією південного узбережжя Біскайської затоки. Регіон характеризується субтропічним середземноморським кліматом з великою кількістю атмосферних опадів і горбистим рельєфом. Промисловість району концентрується навколо двох великих міст – Авілес та Хіхон. Основними підприємствами тут є два потужні металургійні заводи – біля Авілесу і біля Хіхону, вугільна теплова електростанція та цементний завод у містечку Абоньо на північному заході від Хіхону (рис. 1). Ґрунтовий покрив у багатьох місцях штучний, утворений внаслідок індустріальної і будівельної діяльності. Природні ґрунти представлені в основному двома типами – це ентисолі та інсептисолі за класифікацією *FAO UNESCO* [11].

Методи дослідження. Під час польових досліджень були відібрані зразки із повних або часткових ґрунтових розрізів загальною кількістю 81 пункт, виконаний їх ґрунтознавчий та ландшафтний опис. У лабораторних умовах проведені вимірювання величини магнітної сприйнятливості (χ) та її частотної залежності (k_{fd}) за допомогою капаметра *MS2* з двочастотним сенсором *MS2B* (*Bartington Instruments*, Великобританія). Техногенні риси у магнітній мінералогії ґрунтів відстежені за формою і параметрами петель магнітного гістерезису, відзнятих на вібромагнітометрі *VSM* (*Molspin*, Великобританія), а також за кривими магнітної сприйнятливості у низько- (від -196°C) та високотемпературних (до 700°C) умовах, отриманими на устаткуванні *Bartington Susceptibility/Temperature System*.

Досліджено кореляційні залежності між магнітними властивостями ґрунтів та вмістом важких металів (свинець, кадмій, нікель, мідь, хром, цинк, залізо, марганець) на 109 зразках. Обрана нерівномірна система точок відбору при польових дослідженнях, спрямована на з'ясування залежності магнетизму ґрунтового покриву від широкого спектру чинників. Узагальнення отриманої різномірної, нерівномірно розподіленої та різномасштабної інформації було проведено за допомогою геоінформаційного підходу у виг-

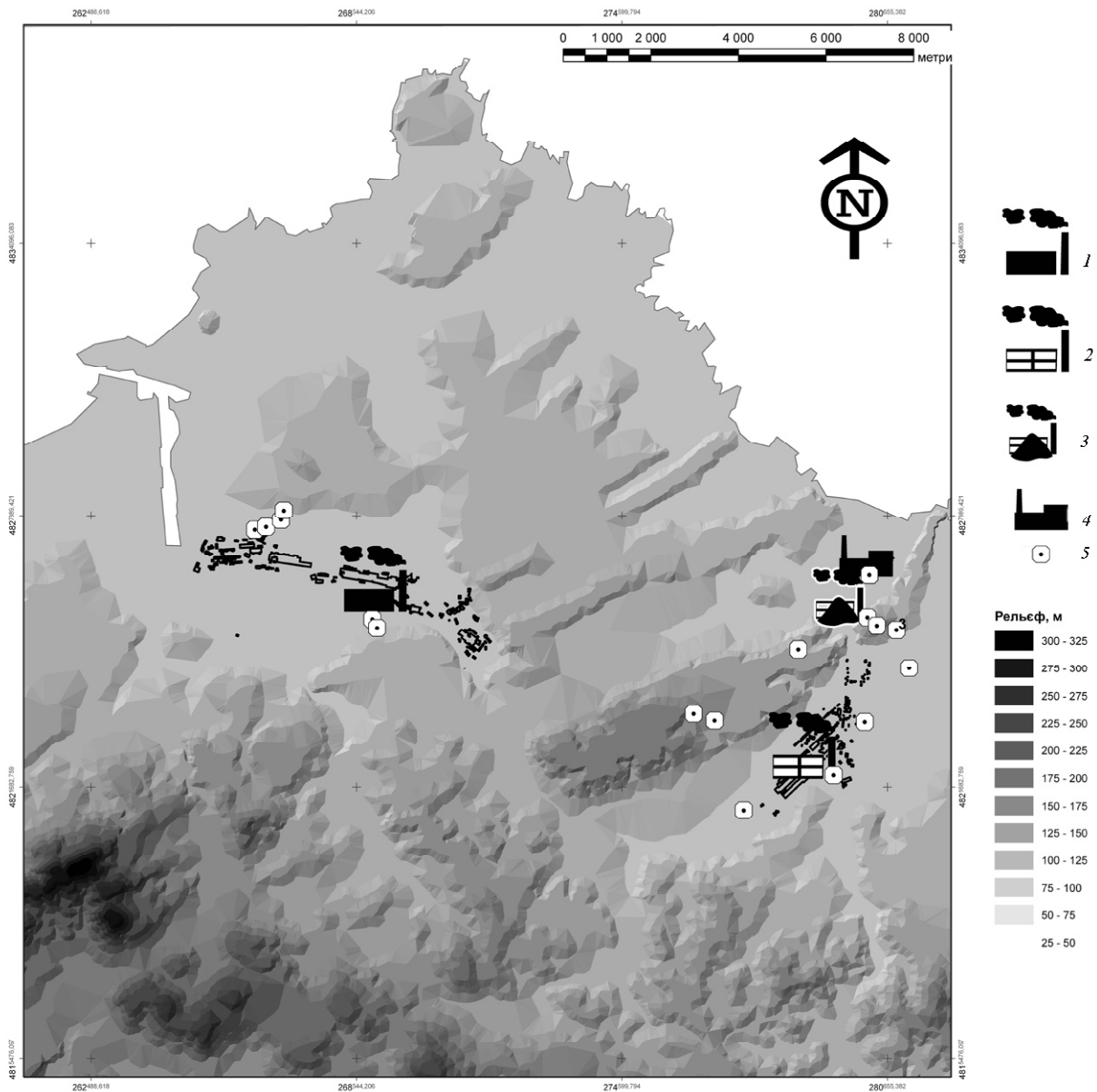


Рис. 1. Схема території дослідження. 1–4 – промислові об’єкти (Металургійні заводи: 1 – Авілес; 2 – Хіхон; 3 – ТЕЦ Абоньо; 4 – цементний завод Абоньо), 5 – пункти спостережень, де встановлено забруднення

ляді ймовірнісної моделі забруднення ґрунту важкими металами для рівномірної мережі пунктів у масштабі 1 : 100000.

Геоінформаційний аналіз виконаний засобами *ArcGIS*, *MS Access*, *MS Excel*, *SS Statistica*. В основу просторової моделі покладені листи топографічної зйомки масштабу 1 : 25000 в системі координат *Universal Transverse Mercator (UTM) European Datum 1950*. Базовий шар рельєфу (крок ізогіпс 25 м) був переведений у триангуляційну мережу (*TIN*). В окремі шари виділені контури промислових підприємств, які мають значну площу і через це не можуть вважатися точковими об’єктами. Геобаза даних геофізичних та геохімічних елементів містить зв’язані таблиці зі вказаними у табл. 1 атрибутами.

Таблиця 1. Головні атрибути та зв'язки геобаз даних території дослідження

Таблиця геодатабази	Атрибут	Поля зв'язків		
Індустріальні підприємства (ІІ)	Координати			Номер ІІ
Точки відбору	Відстані до ІІ (4)	Координати (довгота, широта, альтитуда) Номер точки		
Ландшафтне положення	Експозиція схилу Тип рослинності			
Ґрунтознавчі дослідження зразків	Тип ґрунту Макроморфологічні властивості Мікроморфологічний опис		глибина відбору зразків	
Петромагнітні дослідження зразків	Об'ємна магнітна сприйнятливість Частотна залежність магнітної сприйнятливості Температурна залежність магнітної сприйнятливості Параметри магнітного гістерезису			
Хімічний аналіз зразків	Ваговий вміст важких металів (8) Коефіцієнти концентрації важких металів (8) Сумарний показник забруднення Індекс насиченості			

Результати дослідження. Поверхневий шар ґрунтів Північної Астурії незалежно від типу характеризується високою природною магнітною сприйнятливістю (до $180 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$), отже розрізнити чисті і забруднені ґрунти за цією ознакою часто неможливо. Хоча поблизу промислових підприємств відмічається зростання χ ґрунтів у середньому вдвічі. Літогенна компонента у магнетизмі ґрунтів іноді домінує над педогенною і навіть техногенною. Ґрунтоутворювальні породи регіону представлені пісковиками або червоно-коричневими силікатними суглинками з більшими чи меншими уламками пісковиків і мають χ до $75 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Незабруднені інсептисолі за магнітною структурою профілю відрізняються від ентисолей наявністю додаткового максимуму χ в ілювіальному горизонті (рис. 2, а). Значний вплив на величину χ справляє тип рослинності у пункті відбору зразків. У чистих ґрунтах під лісом магнітна сприйнятливість суттєво вища ніж на трав'янис-

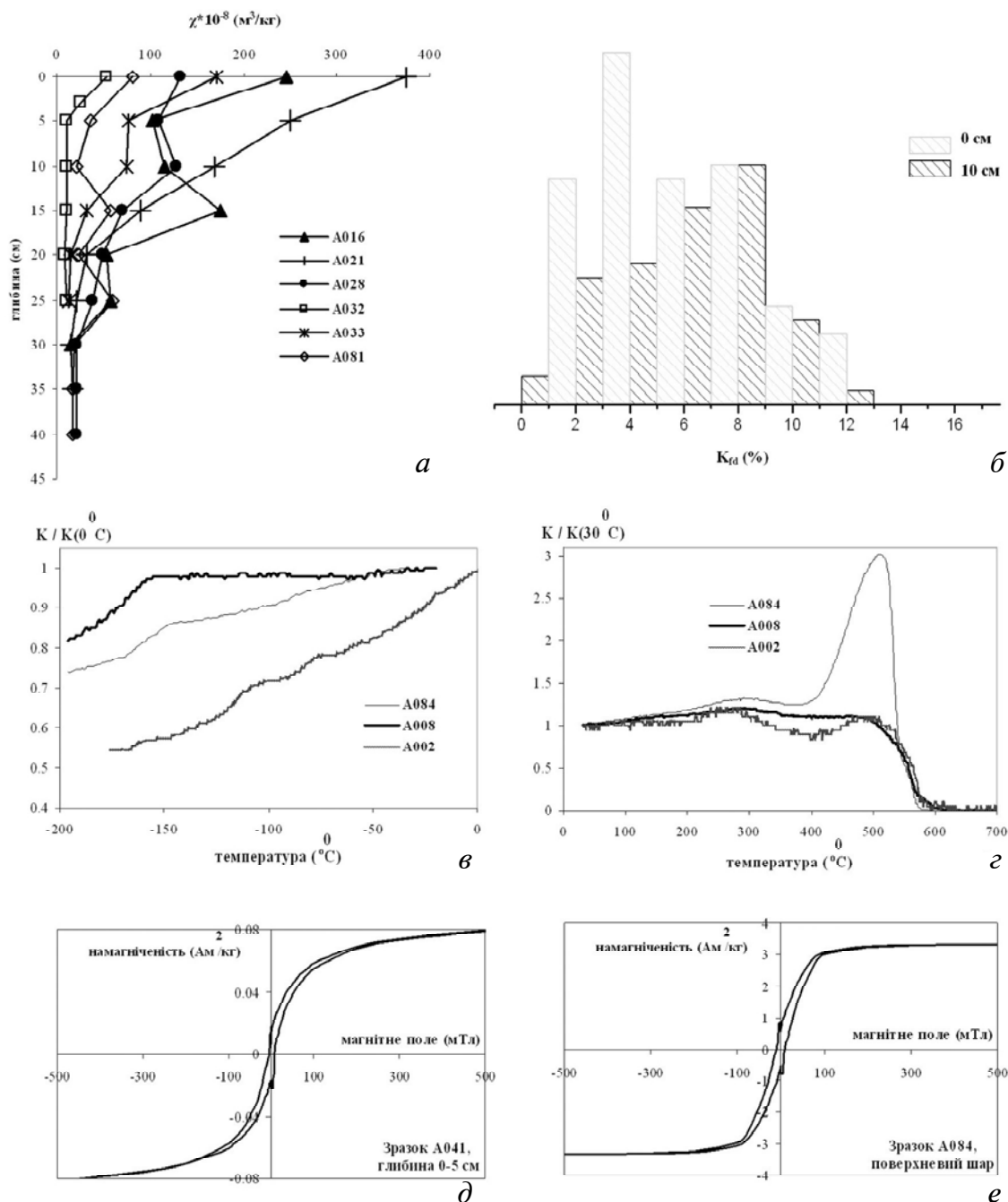


Рис. 2. Петромагнітні властивості ґрунтів Північної Астурії (пункти А008, А016, А021, А081, А084 розташовані в зонах впливу промислових підприємств, пункти А002, А032, А033, А041 – фонові)

тих ділянках. Під впливом техногенного забруднення різниця k ґрунтів між відкритими та залісненими територіями зменшується до повного зникнення біля заводів [12]. Частотна залежність магнітної сприйнятливості поверхневого шару ґрунтів складає 6–12 % на великій відстані від промислових центрів і спадає до 0–2 % поблизу підприємств (рис. 2, б). Підповерхневий шар зберігає природне значення k_{fd} , що свідчить про невисоку міграційну здатність феримагнітного забруднення у шарі ґрунту.

Основним магнітним мінералом, який містять аеротехногенні частки, є магнетит, що діагностується за двома основними ознаками на кривих

температурних залежностей магнітної сприйнятливості: піком Вервея в околі -150°C (рис. 2, в) та яскравим піком (підвищенням у 3–11 разів) при 515°C , обумовленим ефектом Гопкінсона (рис. 2, г). Вигляд останнього піку є характерним і відрізняється від прояву синтезу вторинного магнетиту в процесі вимірювального нагріву чистих ґрунтів за обмеженого доступу повітря [13]. Для зразка А008 (рис. 1, в), відібраного безпосередньо біля металургійного заводу, зафіксована температура Кюрі 620°C , що може свідчити про сильну окисненість техногенного магнетиту.

Петлі магнітного гістерезису чистих ґрунтів вузькі і мають нахил, обумовлений вмістом парамагнітного матеріалу (рис. 2, д). Магнітне забруднення змінює форму петлі на “прямокутну”, при цьому повна (M_s) і залишкова (M_{rs}) намагніченість насичення, а також коерцитивна сила і руйнівальне поле помітно зростають (рис. 2, е).

Таким чином, можна стверджувати, що індустріальний вплив на території Північної Астурії збільшує магнітну сприйнятливість ґрунтів, зменшує її частотну залежність, призводить до зростання магнітної жорсткості поверхневого шару природних ґрунтів, а також до істотних змін магнітної мінералогії. За результатами петромагнітних досліджень ґрунтів Астурії визначені їх критерії забрудненості – $M_{rs} > 0,014$ і $M_s > 0,1 \text{ A}/(\text{m}^2\text{кг})$, $\chi > 180 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$, $k_{fd} < 5 \%$.

За вмістом важких металів ґрунти Північної Астурії поділяються на фонові та забруднені. Забрудненими визнані місця, де концентрація елемента перевищувала фонову більше ніж на три величини середньоквадратичного відхилення. До пріоритетних поліютантів ґрунтового покриву регіону належать свинець, кадмій та цинк, що, очевидно, пов’язано з особливостями техногенезу на цій території [12]. Зафіксовано також підвищення вмісту міді. Сумарний показник забруднення (Z_c) [14] на поверхні ґрунтів біля промислових підприємств досягає 51 і різко спадає до 0–3 на глибині 10 см.

Пункти визнані забрудненими за вищенаведеними петромагнітними критеріями, концентруються на двох ділянках: в околі металургійного заводу біля Авілесу (район А1) та навколо містечка Абоньо на захід від Хіхону (район А2) (рис. 1). Отже, вважаємо за доцільне розглядати окремо ці два райони, включивши до відповідних вибірок прилеглі ділянки з фоновими петромагнітними та геохімічними властивостями. Крім того, перший з них є прикладом промислового тиску на природну екосистему окремого металургійного заводу, в той час як другий містить кілька різних джерел (металургійний завод, теплова електростанція, цементний завод), викиди яких можуть відрізнятися як за магнітними, так і геохімічними ознаками.

У ґрунтах району А1 спостерігається кореляційний зв’язок магнітних властивостей з вмістом основних поліютантів – свинцю, кадмію та цинку

Таблиця 2. Кореляційна матриця петромагнітних властивостей та вмісту важких металів для ґрунтів регіону А1

Магнітні властивості	Вміст важких металів								
	Pb	Cd	Cu	Ni	Cr	Zn	Mn	Fe	Zc
Магнітна сприйнятливість (χ)	0,7	0,55	н/зн	н/зн	н/зн	0,53	н/зн	н/зн	н/зн
Частотна залежність (k_{fd})	-0,76	-0,57	-0,63	н/зн	н/зн	-0,68	н/зн	н/зн	-0,57

(табл. 2). Відмічається значуща обернена кореляція між вмістом міді та k_{fd} . Розподіл марганцю, заліза, хрому та нікелю має незалежний характер і відображає природну мінливість концентрацій цих елементів у ландшафті.

Частотна залежність магнітної сприйнятливості виявилася більш чутливим індикатором техногенного тиску порівняно з χ . Залежності k_{fd} від вмісту свинцю та цинку в районі підкоряються логарифмічному закону, в “хвостах” кривих знаходяться пункти, для яких техногенне походження магнітного матеріалу доведено значним перевищенням вмісту елемента в межах аномалії над місцевим геохімічним фоном (рис. 3).

Zc, як інтегральний показник насиченості ґрунту металами, вміст яких перевищує фоновий, корелює із k_{fd} (табл. 2) на відміну від χ . Досліджені трансекти на північ та південь від заводу показали експоненційний характер зменшення вмісту важких металів у міру віддалення від джерела (заводу). Додатковим бар’єром на шляху аеротехногенного пилу є гірські пасма, що оточують завод. Так, всі пункти району А1, які за магнітними даними мають ознаки забруднення, локалізовані у широкій передгірській долині Авілеса, відкритої лише на захід у бік океану. (рис. 1). Там, де ширина хребтів

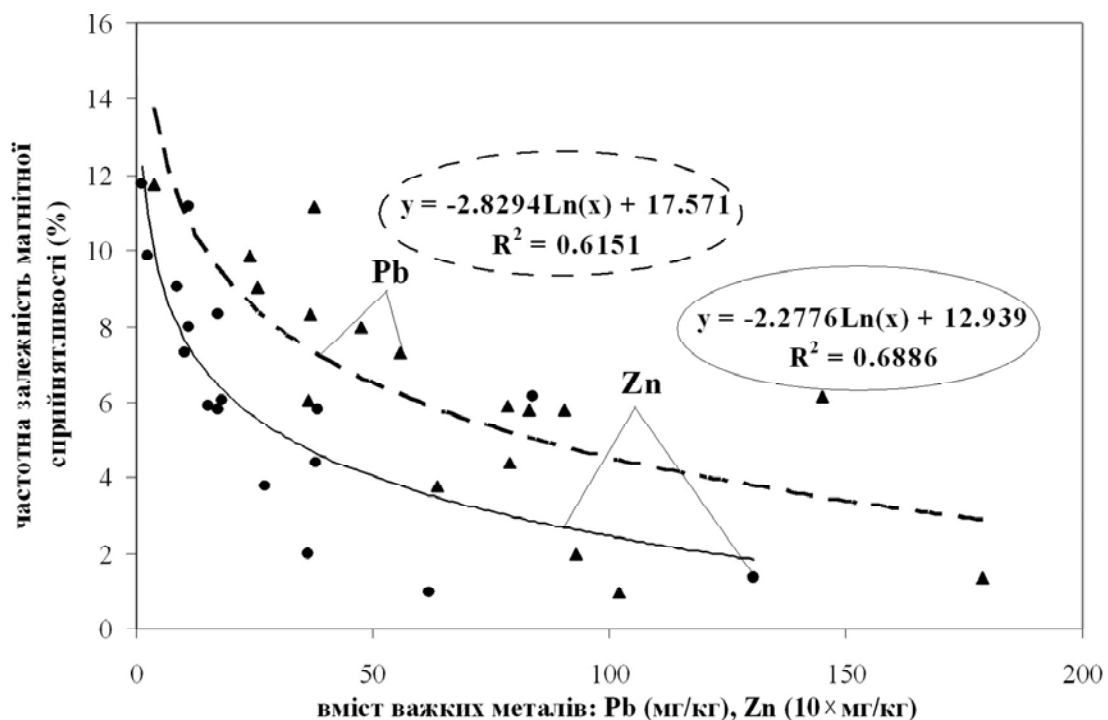


Рис. 3. Залежність k_{fd} від вмісту важких металів у ґрунтах району А1

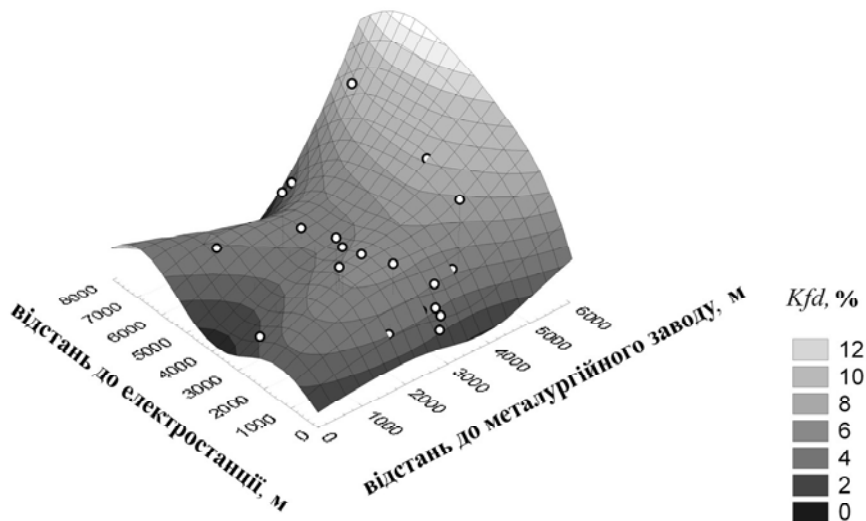


Рис. 4. Сплайн-апроксимація залежності k_{fd} ґрунтів району А2 від їх положення відносно основних забруднювачів

мінімальна, забруднення може проникати у сусідні долини. Не виявлено істотної кореляції між експозицією схилу відносно заводу у пункті відбору та вмістом важких металів, проте наявність поліютантів у ґрунтах добре узгоджується з картою видимості промислових об'єктів.

Для району А2 визначено характерну зону впливу окремих поліютантів на величину частотної залежності магнітної сприйнятливості (рис. 4). На рівні $k_{fd} = 5\%$ вона склала приблизно 2,5 км для металургійного заводу і 1,5 км для вугільної електростанції. Нахил апроксимованої поверхні k_{fd} в напрямку від металургійного заводу набагато пологіший, ніж від електростанції, що свідчить про потужніший ареал впливу металургійного виробництва на довкілля.

Отримані кореляційні залежності, що враховують відстань до підприємств-забруднювачів (табл. 3) показують, що у викидах металургійного комбінату техногенний магнетит асоціює зі свинцем та кадмієм, а поблизу вугільної електростанції – зі свинцем, міддю та цинком.

Проте, у зоні перекриття ареалів впливу різних заводів необхідно враховувати комплексний показник ураженості ґрунту, яким може бути магнітна сприйнятливість.

Таблиця 3. Кореляційна матриця магнітної сприйнятливості та вмісту важких металів у ґрунтах району А2

Умови опробування	Коефіцієнт кореляції між χ та вмістом важкого металу			
	Pb	Cd	Cu	Zn
До електростанції > 1,5 км, до металургійного заводу < 3 км	0,72	0,74	н/зн	н/зн
До електростанції < 1,5 км, до металургійного заводу 2–4 км	0,73	н/зн	0,75	0,6

* н/зн – незначущий коефіцієнт

Прогнозна модель забруднення ґрунтів. Зважаючи на нерівномірність та розрідженість польової мережі пунктів відбору зразків ми спробували побудувати прогнозу модель просторового розподілу забруднення ґрунтового покриву території геоінформаційними засобами.

Проведені петромагнітні дослідження на зразках та просторово-статистичний аналіз дозволили встановити класифікаційні межі магнітних та ландшафтно-географічних параметрів, що відповідають п'яти класам геохімічного індексу насичення ґрунтів важкими металами: не насичені, слабо насичені, середньо насичені (фонові), насичені та дуже насичені. При класифікації в опорних пунктах були прийняті до уваги 4 петромагнітні, 7 геохімічних та 6 просторово-ландшафтних ознак. Віднесення петромагнітних та геохімічних ознак до певного класу проводили відповідно до величини відхилення від фонового показника із врахуванням середньоквадратичної похибки. До уваги не брали полютанти, для яких не доведено техногенної природи їх підвищеного вмісту в ґрунті (залізо, марганець, нікель, хром). На жаль, для досліджуваного регіону наявна лише дрібномасштабна карта розповсюдження ґрунтів (масштаб 1:1000000), що не дозволяє повноцінно використовувати цю ознаку для просторового аналізу.

За цими даними на першому етапі побудована багатопараметрична ймовірнісна модель насичення ґрунтів важкими металами (фактору забруднення) в опорних пунктах. Отримані значення фактору – від 10 до 89 % (одиниці відповідають ймовірності забруднення). На другому етапі вирішена просторова задача прогнозування фактору забруднення на регулярну мережу точок спостереження (рис. 5). При прогнозі брали до уваги просторово-ландшафтні ознаки, визначені за топографічними картами масштабу 1:10000, а саме: відстані від пунктів до об'єктів промисловості, експозиція схилів відносно заводів, а також наявність прямої видимості між ними. Інтерполяційна модель знижує точність прогнозу, відповідно для регулярної мережі пунктів отримані вужчі межі фактору забруднення: 24–69 %. Побудована модель показує узагальнений характер розповсюдження техногенних пилових часток і в окремих точках може не співпадати із даними в опорних пунктах. Безумовно на місцевості спостерігаються локальні варіації вмісту важких металів, зумовлені мікрорельєфом, наявністю забудови, мінливістю геологічних чинників – типів ґрунтів та ґрунтоутворювальних порід, а також гідрогеологічними чинниками.

Обговорення. Аналізуючи прогнозу модель можна побачити, що області підвищених значень фактору забруднення (> 54 %) охоплюють обидва промислових райони, поступово долаючи природну ландшафтну перепону між ними – хребет на схід від Табази. Розчленований рельєф та, можливо, пом'якшувальний вплив Атлантичного океану, поки не дозволяють забруд-

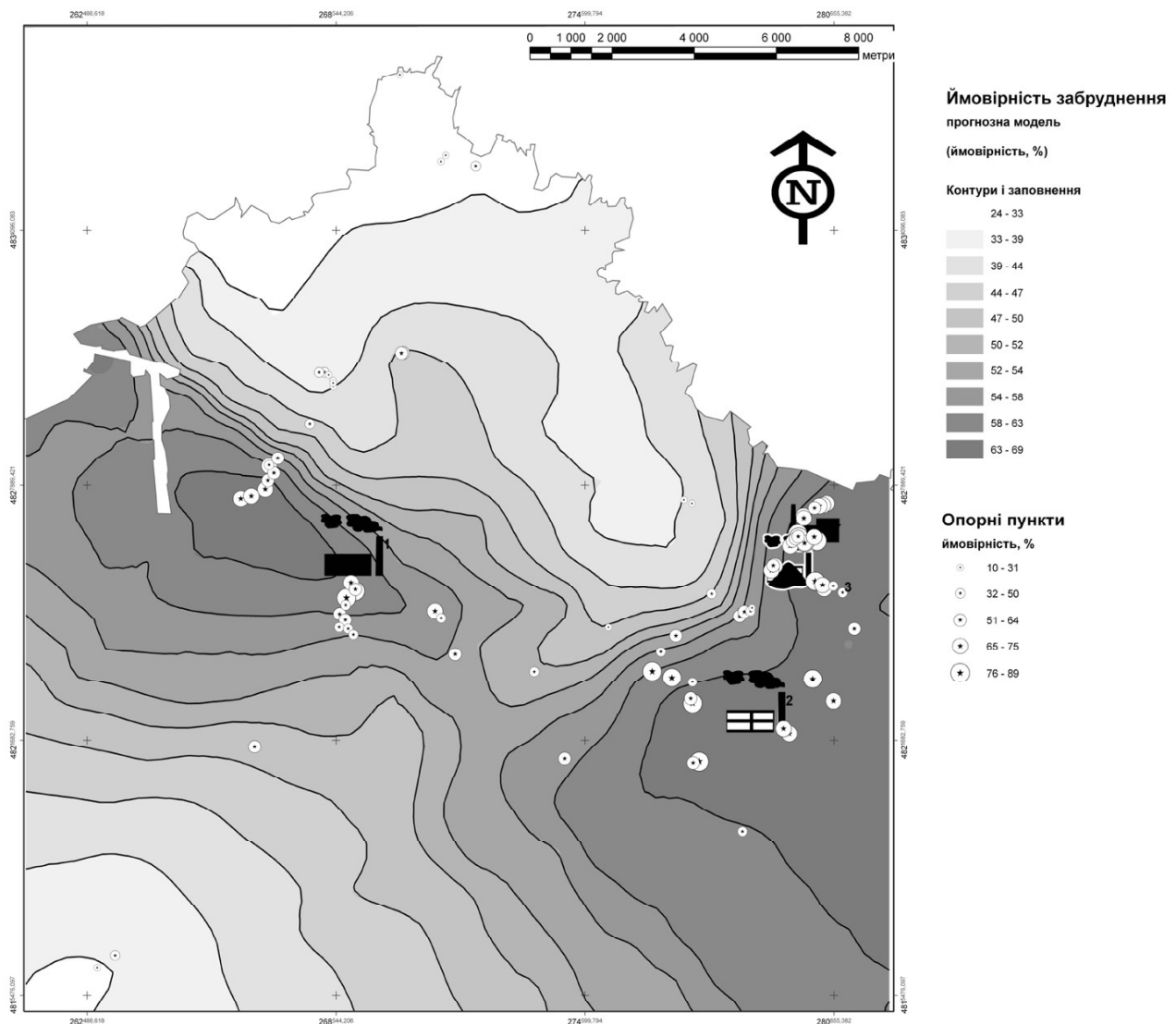


Рис. 5. Просторовий розподіл ймовірності забруднення ґрунтів Північної Астурії важкими металами за даними геоінформаційного моделювання. Умовні позначення див. на рис. 1

ненню проникнути у північну частину півострова, де розташовані деякі із курортів Коста Верде (Зелене узбережжя), а також південніше – на більш високі, вкриті лісами хребти. Характерний для рельєфу Північної Астурії радіус зони забруднення ґрунтів викидами підприємств чорної металургії дозволяє знехтувати впливом на регіон ще одного металургійного заводу, розташованого поблизу м. Овьєдо (9 км південніше границі території дослідження та 18 км на південь від м. Авілес).

Співставлення окремих ознак забрудненості ґрунтів не показало функціональної залежності між вмістом важких металів та окремими петромагнітними або ландшафтно-географічними параметрами. Тому необхідним є застосування геоінформаційного моделювання із залученням якомога більшої кількості параметрів. Обґрунтування класифікаційних меж кож-

ної ознаки вимагає ретельних лабораторних або польових досліджень. Для кожного регіону, де плануються подібні дослідження, обов'язковими етапами робіт будуть:

- 1) польовий – з відбором зразків ґрунтів та ґрунтознавчими спостереженнями в опорних пунктах;
- 2) лабораторний – із визначенням петромагнітних та геохімічних параметрів ґрунтів;
- 3) інтерпретаційний – із доведенням критеріїв наявності поліютантів у ґрунтах та їх зв'язків з петромагнітними характеристиками, притаманним даному регіону;
- 4) геоінформаційний – з просторовим аналізом ознак забрудненості ґрунтів території та побудовою прогнозної ймовірнісної моделі;
- 5) картувальний – що проводиться за допомогою польових магнітних методів (за необхідності отримання карти забрудненості обраного масштабу).

Порівняльний аналіз отриманої моделі з розподілами петромагнітних параметрів показав найкращі результати для частотної залежності магнітної сприйнятливості. У зв'язку з тим, що вимірювання k_{fd} можливі тільки в умовах польової лабораторії, картування за цим параметром доцільно здійснювати для локальних ділянок. Під час регіональних екологічних досліджень можна рекомендувати картування ґрунтового покриття за допомогою доступних комерційних польових вимірювачів магнітної сприйнятливості.

Висновки. Геоінформаційний підхід дозволив створити узагальнену багатofакторну просторову модель техногенної забрудненості ґрунтів регіону станом на 2006 рік. Для Північної Астурії, ґрунти якої характеризуються високим природним магнетизмом, розроблені петромагнітні критерії техногенної ураженості ґрунтового покриття. Доведений зв'язок між вмістом свинцю, кадмію, цинку, міді і магнітною сприйнятливістю та її частотною залежністю для ґрунтів регіону. Це робить можливим екологічне картування ґрунтового покриття за магнітними властивостями. Показано, що аеротехногенні викиди підприємств-забруднювачів осаджуються переважно в межах долин, що оточують територію підприємств. Гірські пасма, що розчленовують територію Північної Астурії, слугують природними бар'єрами на шляху повітряної міграції техногенного пилу.

Робота виконана за сприяння Міністерства охорони навколишнього середовища Іспанії. Вимірювання магнітних властивостей частково проведені у магнітній лабораторії компанії *Aretech Solutions* (Мадрид, Іспанія). Визначення вмісту важких металів виконані доц. Ю.М. Дмитруком (Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича). Польові дослідження проведені за участі проф. Ж.М. Матвіїшиної (Інститут географії НАН України), доц. Д.В. Кравченка (КНУТШ), співробітників *Aretech Solutions*.

1. Heller F., Strzyszcz Z., Magiera T. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland // *J. Geophys. Res.* – 103/B8. 1998. – P. 767–774.
2. Petrovsky E., Kapicka A., Jordanova N. et al. Low-field susceptibility: a proxy method of estimating increased pollution of different environmental systems // *Environ. Geol.* 2000. – 39,3. – 4. – P. 312–318.
3. Lu S.G., Bai S.Q. Study on correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China // *J. Applied Geoph.* – 2006. – 60. – P. 1–12.
4. Sukhorada A., Bondar K., Jelenska M. et al. Spatial distribution of ferrimagnetic pollution from iron-ore open-cast mines and metallurgical enterprises of Kryvyi Rig and Mariupol // *Contributions to Geophysics & Geodesy.* – 2004. – 34. – P. 145–146.
5. Bitukova L., Scholger R., Birke M. Magnetic susceptibility as indicator of environmental pollution of soils in Tallinn // *Physics and Chemistry of the Earth.* – 1999. – 24. – P. 829–835.
6. Evans M.E., Heller F. Environmental magnetism. Principles and Applications of Enviromagnetics // *International Geophysics series.* – 2003. – 86. – 299 p.
7. Водяницкий Ю.Н., Добровольский В.В. Железистые минералы и тяжелые металлы в почвах. – М. 1998. – 216 с.
8. Fialova H., Maier G., Petrovsky E. et al. Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings // *Applied Geoph.* – 2006. – 59. – P. 273–283.
9. Dearing, J.A., Hay K.L., Baban S.M.J. et al. Magnetic susceptibility of soil: An evaluation of conflicting theories using a national data set // *Geophysical Journal International.* – 127. – P. 728–734.
10. Ивченко Б.П., Мартыщенко Л.А. Информационная экология. – Ч. 1: Оценка риска техногенных аварий и катастроф. Статистическая интерпретация экологического мониторинга. Моделирование и прогнозирование экологических ситуаций. – СПб.: Нордмед-Издат, 1998. – 208 с.
11. Soil Map of the World FAO-UNESCO. Revised Legend with corrections and uptades. – Published by ISRIC, Wageningen, 1997. – 140 p.
12. Бондар К.М., Дмитрук Ю.М., Віршило І.В., Матвіїшина Ж.М. Магнітна сприйнятливість та вміст важких металів у чистих і промислово забруднених ґрунтах Північної Астурії (Іспанія) // *Вісн. Київ. ун-ту. Геологія.* – 2007. – Вип. 42. – С. 88–91.
13. Van Velzen A. J., Dekkers M. J. The incorporation of thermal methods in mineral magnetism of loess–paleosol sequences: a brief overview // *Chinese Science Bulletin.* – 1999. – 44. – P. 53–63.
14. Сагт Ю.Е. и др. Геохимические особенности сельскохозяйственных территорий // *Труды биогеохим. лаборатории.* – Т. 22. – Москва: Наука, 1991. – С. 147–171.