

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

СИСТЕМОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВІЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЯКОСТІ ҐРУНТІВ ТА СИСТЕМИ «ҐРУНТ–РОСЛИНИ» ТЕХНОГЕННИХ ТЕРИТОРІЙ

Т. В. Козуля¹¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

УДК 681.518:658.519

DOI: 10.52363/2522-1892.2025.2.1

Отримано: 01 серпня 2025

Прийнято: 27 листопада 2025

Cite as: Kozulia T. (2025). Arbitrary processes research systemology of soil ecological quality recovery and anthropogenic territories “soil-plants” systems. Technogenic and ecological safety, 18(2/2025), 3–13. doi: 10.52363/2522-1892.2025.2.1

Анотація

У статті розглянуті питання комплексного аналізу екологічного стану техногенно-навантажених територій з позицій ідентифікації відновлення якості екосистем завдяки перебігу довільних процесів між політантами у ґрунтах. Дослідження проводилися відповідно до запропонованого системологічного аналізу об'єктів природно-техногенних комплексів. В аналітичну систему оцінки екологічної відповідності дослідженого об'єкта закладена ідеологія комплексного підходу з подання інформації у формі, зручній щодо аналізу та обробки. Сама аналітична система складається з декількох систем, а саме «стан–процес» і «ґрунт–рослини». Кожна з цих систем окремо виявляє порушення екологічної якості дослідного об'єкта за результатами оцінки рівноваги «об'єкт–навіколишнє середовище» (системологія дослідження).

Запропоновано комплексне врахування чинників порушення екологічної рівноваги відповідно до отриманих результатів оцінювання екологічної відповідності за такою послідовністю: проведення експериментально-аналітичних досліджень, статистичний аналіз, дані обробки даних ГІС, використання ентропійної функції стану політантів та їх участі у трансформаційних змінах.

Основні практичні результати роботи пов'язані з дослідженням «стан–процес» в межах системи «ґрунт» техногенно порушених територій. Відповідно до системологічної ідеології дослідження ґрунт розглядається як термодинамічна система, що має певне системне оточення. Таким чином враховуються не тільки внутрішні взаємодії складових ґрунту, а і зовнішні ефекти суміжних систем. Співставлення системних зв'язків і результатів аналітичних дослідів дозволило встановити вірогідні процесні перетворення політантів в межах ґрунтів. Відзначені позитивні трансформаційні зміни стану забруднювачів у ґрунтових системах завдяки втраті їх мобільності. Це стало підставою для ствердження щодо ймовірності самовідновлення природної функціональності техногенно-навантажених територій. Багаторічні дослідження техногенно-навантажених ґрунтів як складних природних систем слугували основою для формування доказової оцінки дії механізмів трансформації політантів у міграційному потоці, що сприяють усуненню порушень стану рівноваги в екосистемі «ґрунт».

Ключові слова: техногенно-екологічна безпека, системологія досліджень, техногенні фактори, контроль екологічної відповідності, ґрунт, системне моделювання, ентропійна функція «стан–процес», ГІС-аналіз.

Постановка проблеми

Актуальність обраного напрямку дослідження щодо формування базової моделі аналітичного дослідження складних техногенно-навантажених природних об'єктів визначена новим кроком у розвитку моніторингу в Україні – прийняття Постанови від 23.07.2024 № 848 «Про затвердження Порядку проведення моніторингу земель і ґрунтів», розробленої Держгеокадастром [1]. Відтепер інформація про будь-яку територію формується на базі даних статистичної звітності соціально-економічних об'єктів стосовно впливу на навіколишнє середовище не тільки внаслідок викидів і скидів, а й визначення змін природного стану ґрунтів. Такі зміни в екологічному контролі якості техногенної діяльності наблизили моніторинг до комплексного оцінювання впливу на довкілля. Природний зв'язок між геосередовищами в межах ландшафтних одиниць дозволяє говорити про відповідні взаємодії як на макрорівні, так і мікрорівні процесних досліджень у межах природно-техногенних об'єктів.

Таким чином, стан будь-якої території, що являє собою природний чи техногенно змінений ландшафт фіксується відповідно до подання об'єкта дослідження як термодинамічної системи. У такому

разі дослідний об'єкт має системне визначення типу «стан–процес». Стан системи виявляють через оцінювання чинників та функцій рівноваги, параметрів стійкості системного утворення. Вивчення системи у такому разі пов'язується, по-перше, з визначенням стану як результату взаємодії дослідної системи з оточуючим середовищем, взаємовплив через термодинамічні зв'язки – обмін речовиною, енергією та інформацією. По-друге, будь-який зв'язок розглядається як ймовірнісна система станів внаслідок постійних коливань складу, інтенсивності термодинамічних потоків в систему й з системи. Отже, опис змін надається у вигляді процесів, що перебігають довільно до встановлення гомеостазу «система–навіколишнє середовище». Така динамічна рівновага включає процеси, які сприяють усуненню негативних факторів впливу на дослідну систему. Ймовірність їх перебігу зростає за наявності чинників, що прискорюють такі процеси. Отже, завдяки синергії факторів взаємодії зовнішнього та внутрішнього характеру в системі, особливостей її зв'язків з оточуючими системами є вірогідність виходу з стресової ситуації та відновлення системи [2].

Для екологічних досліджень такий системологічний підхід важливий, якщо мова йде

про оцінку стану техногенних ландшафтів і пошуку екологічного рішення щодо відтворення їх природної функціональності.

Отже, актуальність даного напрямку наукового пошуку системи оцінювання стану техногенно-навантажених територій з метою визначення засобів уникнення втрати ними природної функціональності та заходів їх відновлення полягає в встановленні існуючих процесів самодовільного досягнення екологічної рівноваги.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Загалом сучасна система моніторингу навколишнього середовища побудована переважно на базі системного дослідження окремих географічних середовищ. Такий підхід використовується для оцінки техногенного навантаження довкілля внаслідок соціально-економічної діяльності. Оцінювання екологічного стану довкілля при наявних факторах порушення природної рівноваги екосистем засновується на результатах аналітичних вимірювань, тобто має статичний характер [3].

Відповідно до інформації оглядової статті за 2025 рік стосовно дослідження стану техногенно-навантажених ґрунтів відзначені основні напрями розподілу важких металів (ВМ), що становлять певний рівень небезпеки для екосистем [4]. У такому разі пріоритетними стають завдання виявлення можливості закріплення поліютантів у ґрунтового покриву за рахунок утворення нових сполук, з'єднання ВМ з органічними і неорганічними речовинами. Ці процеси приводять до зниження рухливості ВМ і тим самим забезпечують уникнення ризику для живих організмів і людини. За результатами наукових досліджень таким вважаються такі процеси:

- зв'язування металів адсорбції, іонного обміну та включення в ґратки Cd, Pb, Cu, Zn;
- розчинність, мобільність та токсичність металів на основі хімічних форм – вільні іони, адсорбовані частинки тощо, Pb, Zn, As;
- адсорбція на поверхні мінералів з втратою рухливості – іонний обмін та комплексотворення – пакетна адсорбція Cu, Cd, Pb;
- утворення нерозчинних металевих сполук – сульфідів, гідроксидів, що знижує біодоступність Cr, Mn, Pb;
- формування стабільних комплексів з органічними або неорганічними лігандами, що знижує розчинність Cu, Cd, As;
- зміна валентного стану металів через окисно-відновні реакції відповідно до окислювально-відновних умов, що впливає на рухливість та токсичність Cr, As, Fe [4].

Наявність бар'єрів для небезпеки від ВМ як поліютантів за рахунок дії ґрунтового покриву відзначено при дослідженні техногенно забруднених сільськогосподарських земель [5].

Аналіз ситуації щодо методології дослідження важких металів у ґрунтах, їх розповсюдження показав, що пріоритетним є використання комплексного підходу [6]. Наприклад, пропонується

комбінувати методи екологічного моніторингу дослідних техногенно-навантажених територій у такій послідовності: аналіз головних компонентів/множинна лінійна регресія (absolute principal component analysis/multiple linear regression (APCS/MLR)), хімічний баланс маси (chemical mass balance (CMB)), позитивна матрична факторизація (positive matrix factorization (PMF)) та модель UNMIX. Для кількісного визначення джерел забруднення використовують зазвичай модель UNMIX і модель PMF, як найбільш поширені моделі. Модель UNMIX базується на принципі лінійної регресії, яка встановлює лінійну залежність між концентраціями хімічних компонентів у рецепторі для ідентифікації джерел забруднення. Кількісно досліджується роль різних важких металів із кожного джерела при наявності невід'ємного обмеження на матрицю розкладання факторів, щоб результуючий спектр компонентів джерела та коефіцієнти внеску не мали від'ємних значень. Часто для аналізу впливу забруднювачів з джерела на стан ґрунтів та водойми комбінують кількісні дані PMF з ГІС-аналізом для просторового опису розподілу джерел викидів речовин на досліджуваній території [6].

Комплексні дослідження впливу на довкілля забруднюючих речовин мали місце в сенсі розгляду системи «ґрунт–вода–рослини» стосовно визначення взаємодії поліютанта зі складовими середовища зі зміною його властивостей [7]. Такі роботи показали, що система «забруднювач–середовище» є динамічною, ймовірнісною системою, в якій фіксуються певні зміни із-за взаємовпливу між забруднюючою речовиною та складовими середовища по шляху її міграції. Відзначено вплив забруднення на **фізичні характеристики ґрунту** – стисливість ґрунту, стабільність, пористість і насипна щільність; **гідрологію ґрунту** – зміна механізму водообміну між ґрунтом та кореннями рослин; **випаровування з ґрунту** – зберігає воду в своїх порах [7].

Трансформації поліютантів у ґрунтах стає дедалі фіксованим фактом. У таких процесах приймають участь не тільки хімічні речовини, а й складова біоти ґрунтів. Так відзначено, що клітинна морфологія сформувалася при впливі високих концентрацій арсеніту. Бактеріальні клітини *M. hydrogenoxydans*, отримані за допомогою Transmission Electron Microscopy (TEM), в багатому середовищі з As(III), змогли окислити 98 % As(III), а інактивована біомаса бактерії демонструвала високу здатність до видалення. Аналогічно, *M. hydrocarbonoxydans* був використаний для перевірки його здатності видаляти інші токсичні ВМ, такі як свинець, кадмій та хром. Порядок стійкості кожного металу був наступним: Cr VI (2,08 г/л) > Pb (1,24 г/л) > Cd (0,169 г/л) [8]. Це має значення для вивчення трансформації поліютантів у міграційному для водної фази у ґрунтах. Подібні процеси вже відзначені для децентралізованих систем очищення забрудненої води, то є ймовірність виявлення ролі бактерій у взаємодії мобільних генетичних елементів з металами, металоїдами в водних складових інших середовищ довкілля [8].

Водне середовище є унікальним для трансформаційних процесів, тому важливі результати досліджень, пов'язані з вивченням проникнення забруднень у ґрунтові води при наявності джерел забруднення. Наприклад, при вивченні екологічної ситуації для різних регіонів сміттєзвалищ з різними умовами підземних шарів та відходів запропоновано використовувати індекс вразливості ґрунтових вод (GWVS) [9]. Однак, треба мати на увазі, що об'ємний коефіцієнт забруднення фільтратом не відображає реальне становище для ґрунтів з низьким вмістом води [9].

Додатковим чинником екологічної небезпеки для ґрунтів України техногенного забруднення є воєнні дії [10]. Висновки щодо дослідження екологічного стану ґрунтів України після воєнних подій свідчать про необхідність додаткового вивчення комбінованої дії негативних факторів на стан ґрунтового покриву [11]. Набувають значення спостереження за вмістом важких металів та їх трансформаційними формами (зміни рухливості).

Підривання гумусового шару на ґрунт через ущільнення має прямі негативні наслідки порушення водного балансу ґрунту та виникнення вітрової і водної ерозії. Результатом розмінування є руйнування гумусового горизонту, відбуваються зміни його гранулометричного та агрегатного стану, погіршення фізико-хімічних властивостей ґрунту [11]. Це впливає на родючість і здатність ґрунту до утримання води. Механічні та фізико-хімічні властивості літогенного покриву змінюються через будівництво технічних споруд, прокладання транспортних шляхів, створення воронки та інтенсивне руйнування поверхневого шару ґрунту. Лісові ґрунти потерпають від пожеж внаслідок вибухів артилерії та військової техніки, знищують сотні тисяч гектарів рослинності. Внаслідок бойових дій забруднені поверхневі та ґрунтові води. Особливе відношення до забруднення земель сільськогосподарського використання. Саме тут стоїть нагальне питання винайти заходи вилучення надлишків Cd, Pb, Cu, Zn, As, Cr, Mn, очистити за допомогою рекультивативної [10]. Таким чином, у будь-якому випадку необхідними є дослідження з виявлення позитивних трансформаційних змін ВМ для утримання їх в нерухомому стані, встановлення можливостей виведення цих поллютантів з кругообігу як небезпечних екофакторів.

Постановка завдання та його вирішення

Мета роботи. На основі результатів дослідження забруднених ґрунтів небезпечних територій внаслідок техногенного впливу виробництв, воєнних дій відзначено за доцільне виявлення механізмів змін стану ґрунтового покриву в наслідок довільних процесів трансформації забруднюючих речовин у безпечні форми, що надає можливості відтворенню природної якості функціонування екосистем і безпосередньо ґрунтів. У роботі пропонується у цьому напрямку дослідити такі задачі:

1) визначення складових комплексної системи ідентифікації форм небезпечних елементів у забруднених ґрунтах;

2) розробка алгоритмічного забезпечення з формування процесного ланцюга трансформації поллютантів, зокрема полівалентних важких металів, для встановлення їх форм розподілу в ґрунтовому покриві;

3) структурування моделі процесів змін ВМ та їх форм знаходження у ґрунтах; оцінка залежності рівня небезпеки ВМ від зав'язків у системному утворенні «об'єкт–системи навоколишнього середовища»;

4) формування системи оцінки екологічного стану ґрунтового покриву за характеристиками форм вмісту ВМ у ґрунті для визначення ймовірності природного довільного відновлення екологічної якості техногенних ландшафтів та функціональності господарських земель після воєнного навантаження.

Для забезпечення рішення задач відновлення порушених земель ставиться цільова задача виявити механізми відновлення якості ґрунтів техногенних ландшафтів за рахунок довільних процесів утворення «позитивних» форм ВМ для утримання їх і виведення з екосистем.

Використання базових основ системології дозволяє поєднати системи у загальний об'єкт дослідження та врахувати взаємовплив на системному і компонентному рівнях щодо створення умов синергетичної підтримки трансформації привнесених в ґрунт елементів.

Пропонується комплексний підхід для формування систем методичного забезпечення оцінки можливостей перебігу процесів трансформації поллютантів за результатами аналітичних досліджень об'єктів техногенного навантаження. У комплексі дослідних методів обов'язковою є інформаційна складова, що надає алгоритмічну і методичну основу проведення досліджень з метою встановлення механізмів трансформації поллютантів у ґрунтовому покриві. З позицій практичної доцільності запропонованого підходу відзначається реальна узгодженість результатів модельних експериментальних досліджень і отриманої інформації з аналітики моніторингових даних (рис. 1–2).

При дослідженні ґрунтового покриву головна увага зосереджується на системі «ґрунт», як окремому утворенні [12]. Більш широке значення ґрунтів розглядається у роботах з геохімії ландшафтів та екології ландшафтів [4–9]. В аспекті розглянутих особливостей формування ґрунтової системи під дією зовнішніх факторів і її взаємодії з оточуючими геоекосистемами, пропонується дослідити «ґрунт» як системне утворення внутрішнього і зовнішнього порядку. При цьому відзначити в такій дослідній системі статичні та динамічні явища, тобто надати екологічну оцінку ґрунту в комплексному зв'язку – формування його складу, виявлення процесів загального характеру та нових явищ фізико-хімічних змін, пов'язаних з дією зовнішніх факторів, що визначають і надходження техногенних забруднень. Для реального відображення стану дослідженої екологічно небезпечної території пропонується сформувати системно-системне визначення екологічного балансу ґрунтів,

що забезпечує екологічну стійкість екосистем за такими вимогами:

1) межа екологічної мінливості процесів функціонування ґрунтового покриву відповідно до дії факторів внутрішнього і зовнішнього характеру, що дозволяє підтримувати відповідний склад, рівень опору змінам, довільність процесів відновлення екологічної якості після порушень;

2) модель оцінювання еколого-техногенної ситуації для дослідженої території порушень із

метою визначення механізмів природного усунення чинників і факторів небезпеки;

3) оцінка результату внутрішніх перетворень і зовнішньої дії за станом вихідних потоків, що вплив на зміни у компонентах ґрунту (див. рис. 2);

4) міждисциплінарні знання для встановлення ймовірності реалізації механізмів забезпечення екологічної стабільності, прийняття рішення щодо умов необхідності втручання в відновні процеси на техногенно навантажених територіях.

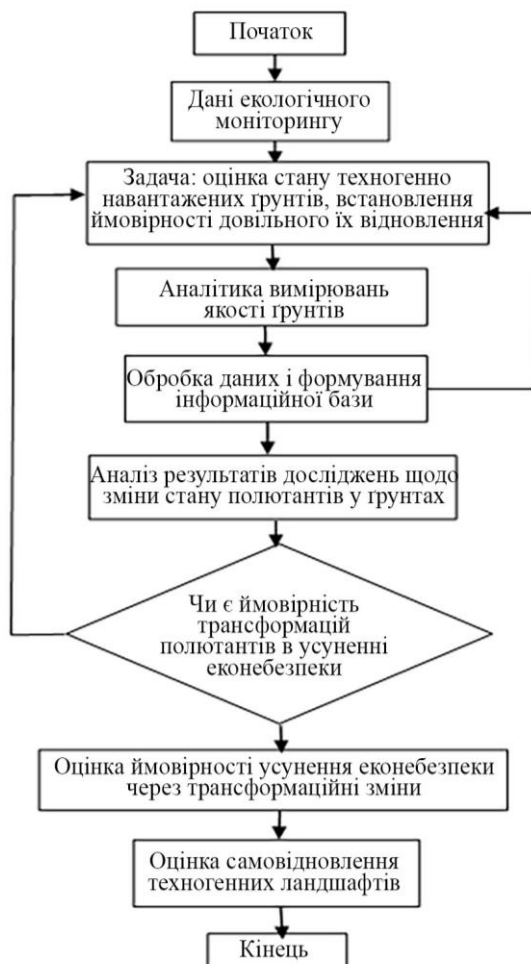


Рисунок 1 – Схема алгоритмічного забезпечення розв’язку задачі дослідження процесів у техногенно забруднених ґрунтах



Рисунок 2 – Схема запропонованого методичного забезпечення дослідження трансформаційних змін стану поліутантів у ґрунтах

Для комплексного дослідження рівня безпечності техногенно-навантаженого об'єкта, оцінювання його екологічного стану пропонується використати положення системології. У такому разі визначена модель дослідної системи становить цілісність статичних і динамічних даних про об'єкт. При проведенні оцінки можливостей реалізації здатності ґрунтів до самоочищення через збільшення складності фактору зовнішнього впливу запропонована системологічна модель виду «ґрунт–зовнішнє навоколишнє середовище–фактори впливу–процеси (результати змін) сприйняття зовнішніх дій–синергійний простір–рівновага (ґрунт–навоколишнє середовище)».

Основою для аналізу вірогідності відновлення екологічного стану антропогенно-навантажених ґрунтів слугували дані багаторічних досліджень на території Зміївського полігону та в м. Харків 1995–2009 рр.[13].

Визначення процесних явищ, пов'язаних з трансформацією у міграційному потоці важких металів, що є забруднювачами ґрунтів, базувалося на результатах ентропійного аналізу довільних процесів виведення цих елементів з біоциклу. При нагромадженні ВМ у ґрунті фіксували їх відсутність у біоматеріалі.

Самоочищення ґрунту встановлювали за оцінкою імовірності зв'язування політантаів у нерозчинні сполуки. Для цього в запропонованій системологічній моделі була передбачена система (4) – процеси (результати змін) сприйняття

зовнішніх дій (рис. 3). Ця система є внутрішньою системою самого ґрунту (1). Вона відображає динаміку зміни забрудненості ґрунтового середовища через значення ентропії порушення гранично допустимих значень концентрацій політантами, що надходять із зовні.

ґрунт, як внутрішня система (1), контролюється системою розподілу політантаів у певних прошарках ґрунтів (2) у вигляді мобільних форм: катіонів (множина X_1 (3^1)) і аніонів (множина (X_2) (3^2)). Стан забруднювачів визначено через ентропійне значення порушень гранично допустимих значень. Результативна система хімічних перетворень (4) розглядається, як інформаційна синергія, що становить процес самоочищення

ґрунт, як зовнішня система (2), відповідно до розподілу політантаів у певних прошарках ґрунту подається у вигляді системи форм існування забруднювачів в міграційному потоці: катіонів (множина X_1 (3^1)) і аніонів (множина (X_2) (3^2)). Така система визначається як високо хаотична з великими значеннями ентропійної функції. Саме в таких умовах вірогідні появи різних форм політантаів, особливо серед полівалентних елементів. Тоді «ґрунт» як термодинамічна система для досягнення рівноваги (зменшення ентропійної напруги) може сприяти такій варіації процесів, результатом яких є утворення ВМ нерозчинних речовин і виведення їх з біологічного обігу, відвернення екологічної небезпеки (рис. 3).

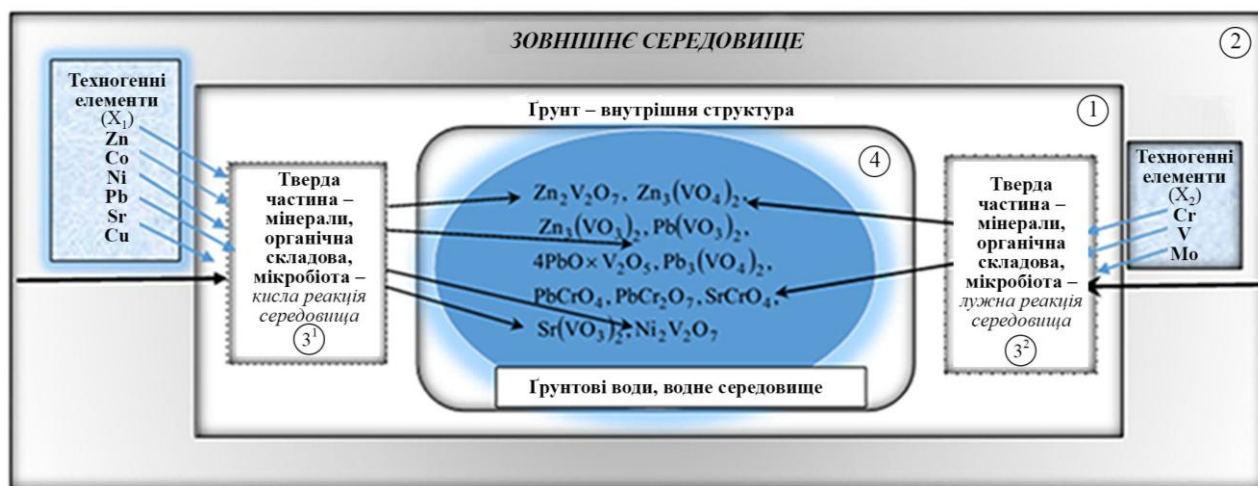


Рисунок 3 – Системологічна модель реалізації самоочищення забруднених ґрунтів:

1 – ґрунт, як внутрішня система; 2 – ґрунт, як зовнішня система;

3 – забруднювачі у формі катіонів (3^1) та аніонів (3^2); 4 – система хімічних перетворень

Порушення у ґрунті відповідності стану екологічної безпеки за рівнем змін вмісту ВМ становить певне значення ентропії внутрішньої системи дослідження (1) (рис. 3).

Стан ґрунтової системи пропонується визначати відповідно до отриманого значення інформаційної ентропії Шеннона для незалежних змін подій X , яким відповідає ΔN -змінений стан, наданий ймовірностями p_n ($n = 1, N$):

$$\Delta S_x = - \sum_{n=1}^N p_n \cdot \log_2 p_n = -M[\log_2 \Delta p_n]. \quad (1)$$

Рішення стосовно ймовірності наявних форм техногенного елемента у ґрунтовому покриві досягається таким чином:

– реалізація необхідного макростану визначається однією ймовірністю як мінімальна ймовірність змін;

– рівномірний розподіл імовірності реалізації станів після змін встановлюють за максимальним значенням відповідно до $\Delta n = 1, \Delta N, \Delta p_n = 1/\Delta N$;

– інші випадки станів або збереження початкового встановлюють за статистичною ентропією Шеннона, наближеної до нульового значення:

$$\Delta S_x = - \sum_{s=1}^l \frac{\Delta N_i}{\Delta N} \cdot \ln \frac{\Delta N_i}{\Delta N}, \quad (2)$$

де ΔN_i – зміни чисельності елементів в об'єкті i -го виду в загальній кількості змін в дослідженій системі ΔN .

Кількість змінених форм можливих за оцінкою значень структурної ентропії відповідає прагненням системи до рівноваги при певних умовах, залежних від зовнішнього оточення $\Delta S \rightarrow 0, S_1 \rightarrow \min \rightarrow \Delta S > 0, S_2 \rightarrow \max$ [14].

Порушення рівноваги вводить термодинамічну систему в хаотичний стан з високим значенням ентропії як функції стану систем. Це викликає пошук системою точки нової рівноваги за рахунок довільних (енергетично маловитратних) процесів. Внутрішнє середовище з відповідними властивостями сприяє процесам трансформації

складових в таких гетерогенних системах. Таким чином, порушений об'єкт отримує можливість реалізувати механізми довільного регулювання гомеостазу в його системах і зовні. «Ґрунт» як система пов'язаний термодинамічними потоками з суміжними системами і складає разом з ними систем-системне утворення «об'єкт–навколишнє середовище» (рис. 3). Урегулювання такої системи загалом в екологічних дослідженнях і розглядається, але статично. Пропонується ввести додатково необхідну складову «процеси» для екологічного оцінювання ситуацій при дії негативних факторів. Ця система має переважно функцію комплексного зв'язку між об'єктом і навколишнім середовищем. Оцінка стану системи «процеси» відбувається з використанням ентропійної функції (рис.4).

Отже, функціональність та змінність систем об'єкта дослідження характеризуються однією функцією стану систем – ентропією. Це дозволяє пов'язувати всі отримані результати аналітичних етапів досліджень екологічного стану «об'єкт–навколишнє середовище», провести порівняльний аналіз рівноваги щодо стану і процесів дослідних систем, погодити загальну комплексну оцінку стосовно стану небезпеки та імовірності її зменшення.

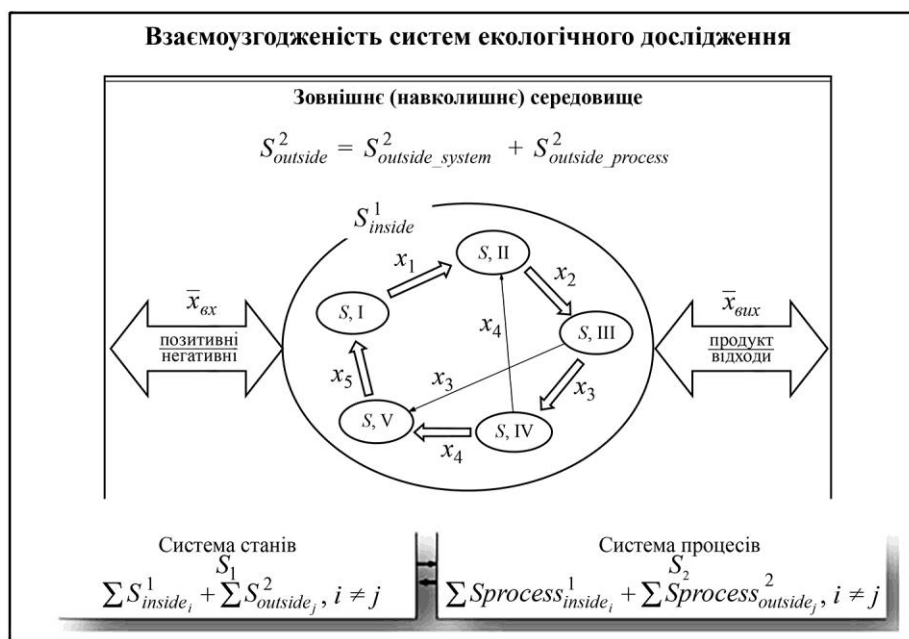


Рисунок 4 – Схема дослідження екостану порушених об'єктів з урахуванням процесів регулювання

При наявності збільшеної кількості екологічно небезпечних речовин у ґрунті пропонується скористатися мірою порушення рівноваги у системі – функцією ентропії [15]. Для важких металів, присутніх у забруднюючому потоці, загалом властиві полівалентні елементи, що відкриває широкі можливості до їх трансформації у будь-якому середовищі. За висновками проведених з 1995 по 2009 рік експериментальних екологічних досліджень щодо поведінки поліютантів у ґрунтах на території Зміївського полігону та м. Харкові відзначено, що геохімічна система ґрунт є

простором розподілу катіонних і аніонних форм ВМ $A_1 = A_2 = \dots = A_m = U$:

$$U = \left\{ \underbrace{\text{Zn, Co, Ni, Pb, Sr, Cu}}_{x_1}, \underbrace{\text{Mo, Cr, V}}_{x_2} \right\},$$

де множина X_1 становить перетворені форми катіонного виду, а множина X_2 – аніоногенного.

Відповідно до розробленої методики аналізу порушення рівноваги в системі у результаті дії поліютантів за ентропійною функцією [16] пропонується встановити можливості поновлення

безпечного стану за рахунок трансформацій. Застосовується така послідовність ентропійного оцінювання «стан – процес»:

1) оцінка відносної рівноваги визначається через функціонал як відношення функції стану «об'єкт–

$$F = \frac{F_{system}}{F_{process}} = \frac{S_{inside_i}^1 = 0 / S_{process_{inside_i}^1} \rightarrow 0}{S_{outside_j}^2 = 0 / S_{process_{outside_j}^2} \rightarrow 0} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{S_{inside_i}^1 / S_{outside_j}^2}{S_{process_{inside_i}^1} / S_{process_{outside_j}^2}} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{S_1}{S_2} \rightarrow 0 \Rightarrow F = 0; (3)$$

де F – функціонал відносної рівноваги; S_{inside}^1 – ентропія стану об'єкта; $S_{inside_i}^1$ – ентропія стану складових систем об'єкта; $S_{outside}^2$ – ентропія зовнішнього середовища; $S_{outside_j}^2$ – ентропія стану систем зовнішнього середовища, що безпосередньо оточують об'єкт; $S_{process_{inside}}^1$ – ентропія процесів, що стосуються внутрішнього простору об'єкта дослідження; $S_{process_{inside_i}}^1$ – ентропія процесів у

навколишнє середовище» до функції характеристики процесів у складових і в системі «об'єкт–навколишнє середовище» (рис. 3, 4):

системах внутрішнього простору об'єкта; $S_{process_{outside}}^2$ – ентропія процесів, що відбуваються в зовнішньому просторі об'єкта дослідження; $S_{process_{outside_j}}^2$ – ентропія процесів, які відзначені в системах, оточуючих об'єкт зовні;

2) досягнення рівноваги на локальному рівні спостережень «об'єкт–навколишнє середовище» встановлюється за даними аналізу імовірності перебігу процесів

$$\frac{S_{inside_i}^1 = \max = \Delta S_{inside_i}^1 \rightarrow 0 \Rightarrow S_1 = 0}{S_{outside_j}^2 = \max = \Delta S_{outside_j}^2 \rightarrow 0 \Rightarrow S_2 \rightarrow 0} \Rightarrow \Delta S_{process_{outside_j}^2} \rightarrow 0. (4)$$

Так, за 15 років спостережень за станом забруднених ґрунтів на території Полігону, як кола дії викидів Зміївської ТЕЦ, відзначена наявність нерозчинних солей, утворених трансформованими формами ВМ (рис. 2). Встановлено, що таким чином доволіно усувається екологічна загроза порушення функціональності природних систем, відновлюється екологічна рівновага, що дозволяє підтримувати природний сталий розвиток екосистем [13–16].

Для простеження за можливостями реалізації механізмів самодовільного урегулювання небезпеки природним шляхом через трансформації поллютантів у міграційному потоці забруднюючих речовин пропонується залучити засоби ГІС. Попередньо відзначено, що при дослідженні забруднених ґрунтів звертають увагу на їх накопичувальну здатність у ґрунтовому покриві та акумулятивні властивості рослин до деяких важких металів, вміст яких у ґрунтах є небезпечним [17]. У роботі зроблено

акцент стосовно поведінки поллютантів у системах навколишнього середовища через їх властивості у міграційному потоці. Для цього використано можливості EOS Data Analytics, а саме LandViewer, що має простий, інтуїтивний web-інтерфейс, який є продуктом EOS [18–21]. Так, за роки моніторингу обраної території впливу Зміївської ТЕС відзначено значні накопичення ВМ, що присутні у викидах, у ґрунтах прируслової заплави, але відсутність їх в рослинному матеріалі. Саме в цих ґрунтах і відзначено рентгенофазовим аналізом наявність трансформованих форм ВМ [13–15]. Зараз спостереження за цією ділянкою перенесені в площину аналізу стану ландшафтів поверхні території Зміївського району с. Геніївка. Розглянуті оціночні дані за 10 років стосовно безпосередньо стану рослинності як тестової системи щодо забрудненості ґрунтів (рис. 5–6).

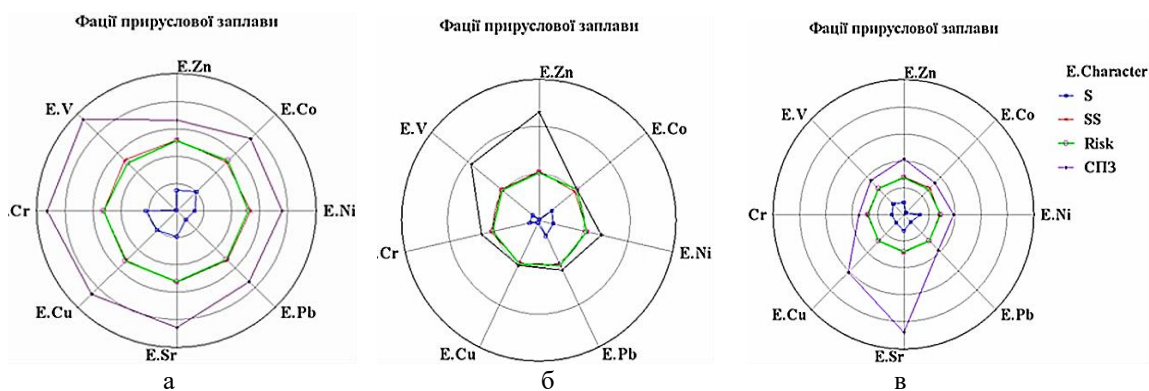
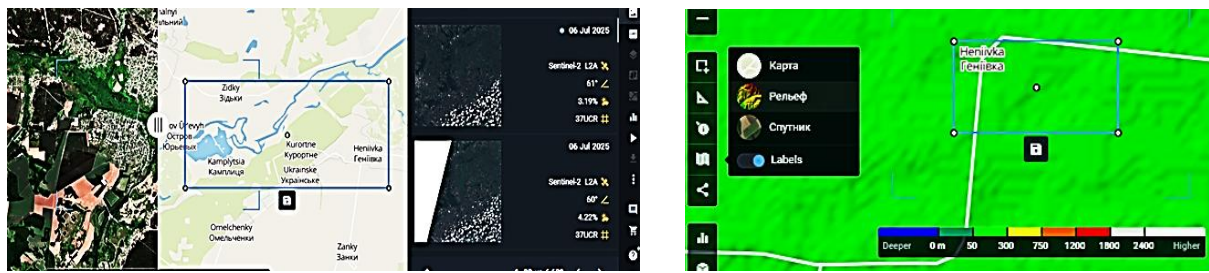
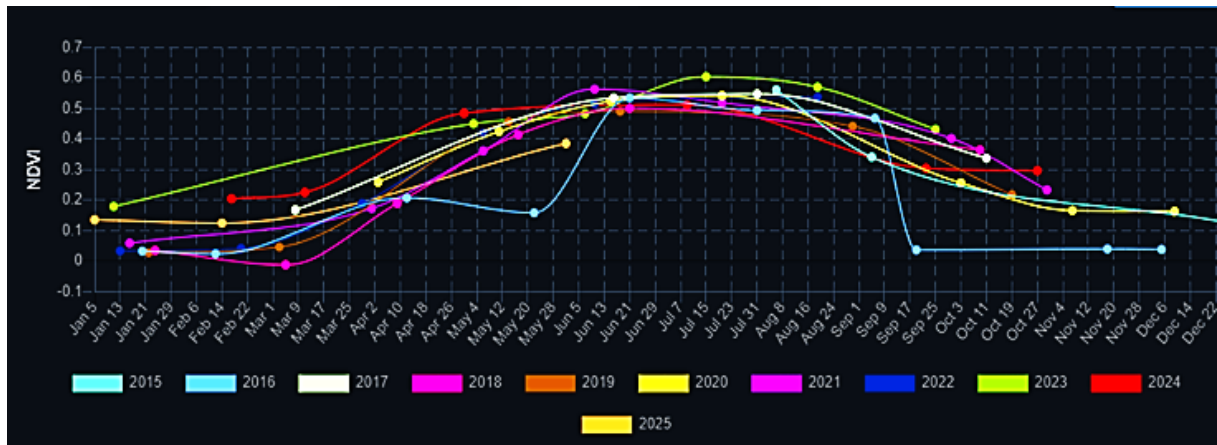


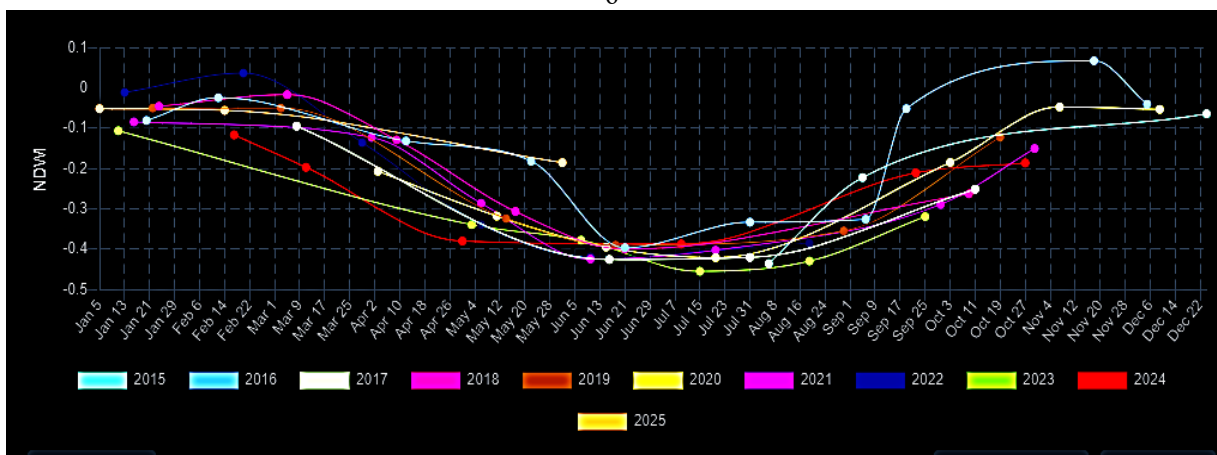
Рисунок 5 – Результати оцінювання стану поллютантів у ґрунтах за аналізом «ґрунт–рослини»: а – ентропійна оцінка стану поллютантів у ґрунтах окремих фацій; б – ентропійна оцінка стану рухливих форм поллютантів у ґрунтах окремих фацій; в – ентропійна оцінка стану важких металів у рослинах окремих фацій; Sp (S) – ентропійна «напруга» за мінімально фіксованим навантаженням; SS – ентропійна оцінка відхилення від нормативу навантаження; СПЗ – індекс забруднення; Risk – ризик-оцінка



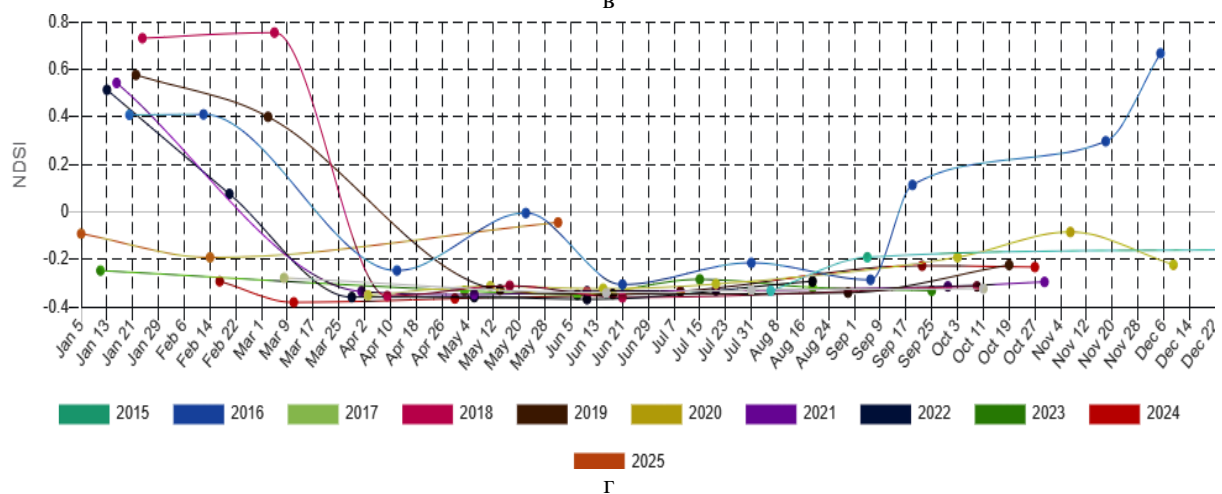
а



б



в



г

Рисунок 6 – Результати аналітичних даних дистанційного зондування поверхні території дослідження – Polygon с. Геніївка Зміївського району Харківської обл.: а – територія дослідження – Полігон, прируслова заплава біля с. Геніївка; б – тенденції змін NDVI; в – динаміка показника NDWI; г – зміни індексу NDSI

Аналіз даних, отриманих на основі дистанційного зондування землі (ДЗЗ), показав, що наявність достатнього водозабезпечення поверхні території створює умови для певних трансформаційних змін поллютантів. Так, присутність значного снігового покриву є середовищем, яке саме акумулює поллютанти і отримує зворотній міграційний потік з поверхні ґрунтового покриву [13–16]. Така динаміка дозволяє концентрувати реакційні форми поллютантів і при достатній кількості ($>10^{-6}M$) викликати довільні реакції з утворення нерозчинних сполук. Ці процеси у ґрунтовому покриві дозволяють уникнути небезпечної дії важких металів на розвиток біотичної складової, що відзначається як самоочищення та збереження функціональності ґрунтів. Відповідно до значень NDSI (Normalized Difference Snow Index, нормалізований різницевий індекс снігу, що використовується для ідентифікації снігу від рослинності, ґрунту та кінцевих елементів літології) та змін величини NDWI (нормалізований різницевий індекс води відноситься до дистанційного зондування та пов'язаних з рідкою водою для моніторингу змін вмісту води в листі та моніторингу змін, пов'язаних із вмістом води) маємо оцінку кількості запасу вологості в рослинному покриві, що є транспортним і реакційним простором для поллютантів (рис. 6) [21]. Ці висновки співпадають з результатами проведених досліджень ґрунтового покриву за період 1990–2009 рр. (рис. 5) [13–16]. Значення індексу NDWI коливаються від -1 до 1 . Звичайний діапазон для зеленої рослинності становить від $-0,1$ до $0,4$. Вважається, що водні об'єкти набувають значення від $0,2$ до 1 , об'єкти, що не містять вологу, мають значення менше 0 (рис. 6). Дійсно, у прирусловій заплаві території дослідження весною і восени мають прояви збільшеної вологості, а в літні місяці за рахунок природного розвитку непошкодженої рослинності має місце від'ємне значення, що корелює надалі зі значеннями NDVI.

Нормалізований вегетаційний індекс (Normalized difference vegetation index (NDVI)) є числовим показником якості та кількості рослинності на ділянці (норми від $0,4$ до 1). Якщо б мали накопичення в ґрунті екологічно небезпечних речовин, то мали б значення індексу від $0,2$ до $0,3$. Це вказувало б на наявність рослинності, яка є нездоровою чи рідкісною. Спостереження щодо переходу поллютантів у рослини (рис. 5) і дані ДЗЗ всі 10 років констатують досягнення величини $NDVI \sim 0,6$ влітку, що вказує на відсутність пригнічення з боку ВМ фітосистеми, наявність здорової, густої рослинності (див. рис. 6).

Таким чином, наявність порушень в природних системах через дію невластивих соціально-економічних зовнішніх факторів викликає у ґрунті низку довірливих процесів, здатних відновити природно рівновагу та уникнути небезпечного забруднення в екосистемах.

Висновки

На базі теоретичного обґрунтування концепції щодо трансформаційних змін поллютантів у міграційному потоці та отриманих результатів вимірювань рівнів забруднення ґрунтів техногенними елементами викидів моніторингових територій дослідження зроблені такі робочі висновки:

1) визначені підстави для концепції трансформації забруднюючих речовин при переміщенні в системах довкілля – встановлено характер формування міграційного потоку поллютантів у навколишньому середовищі як багатокomпонентної системи, що змінюється під впливом внутрішніх і зовнішніх факторів; надані результати ідентифікації форм небезпечних елементів у забруднених ґрунтах;

2) розроблено алгоритмічне забезпечення розв'язку задачі виявлення механізмів самодовільного відновлення функціональності техногенних ландшафтів, що дозволяє для певних умов встановити ланцюг трансформаційних змін стану забруднювачів і їх розподіл в ґрунтовому покриві (рис. 2–3);

3) відзначено можливості позитивних процесів усунення екологічної небезпеки на забруднених територіях завдяки зв'язування ВМ у нерозчинні сполуки і виведення їх з біологічного метаболізму – теоретичні розрахунки за ентропійною функцією змін стану ВМ підтверджені результатами експериментальних дослідів в системі «ґрунт–рослини» та висновками аналітичної оцінки екологічного стану поверхні території завдяки ГІС (рис. 4–5);

4) надана система математичних моделей у вигляді ентропійних функцій для визначення ймовірності природного довірливого відновлення екологічної якості техногенно навантажених ландшафтів та функціональності господарських земель після воєнного навантаження за рахунок утворення трансформаційними формами поллютантів безпечних для екосистем речовин.

Таким чином, **новизною даної роботи** є пропозиція концептуальної системи визначення процесів довірливої зміни стану поллютантів у безпечні форми через механізми їх трансформації у міграційному потоці, що дозволяє реалізувати відтворення природної якості та функціональності екосистем і безпосередньо ґрунтів.

Робота потребує **подальшого розвитку теоретичних знань щодо визначення можливостей позитивних змін стану поллютантів у певних середовищах довкілля**, встановлення ймовірності уникнення ризиків техногенної небезпеки для ланцюга її розвитку «(навколишнє середовище–об'єкт)–системи забруднення–стан трансформаційних змін форм поллютанту в системах навколишнього середовища–екологічна безпечність довірливих процесів досягнення рівноваги в порушених системах довкілля».

ЛІТЕРАТУРА

1. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку проведення моніторингу земель і ґрунтів» від 23.07.2024 р. № 848. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/848-2024-%D0%BF#Text>.
2. Козуля Т. В., Козуля М. М. Інформаційно-методичні основи підтримки прийняття рішень для комплексного дослідження системних об'єктів: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. 231 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/51bd528f-330f-4a59-b030-b7e6db891b6a>.
3. Екологічний моніторинг. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URI: <https://mepr.gov.ua/topics/novyny-ekologichnyj-monitoryng-novyny/>.
4. Bibliometric analysis and impact of heavy metals contamination in soils / M. Kamaraj, N. Kiruthika, T. Saranya, J. Aravind. *Global Journal of Environmental Science and Management*. 2025. Vol. 11(1). P. 321–342 DOI: 10.22034/gjesm.2025.01.19.
5. Sharafi S., Salehi F. Comprehensive assessment of heavy metal (HMs) contamination and associated health risks in agricultural soils and groundwater proximal to industrial sites. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15(1). Art.: 7518. DOI: 10.1038/s41598-025-91453-7.
6. A combined model method was used to identify the main influencing factors of soil heavy metal pollution sources in Qian river, China / Y. Li et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15(1). Art.: 14040. DOI: 10.1038/s41598-025-98881-5.
7. Potential impacts of microplastic pollution on soil–water–plant dynamics / A. Bakhshae et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art.: 9784. DOI: 10.1038/s41598-025-93668-0.
8. Assessment of arsenite removal efficiency, resistance, and biotransformation by *Microbacterium hydroxycarbonoxydans* isolated from contaminated sites / U. E. Rodríguez-Castrejón et al. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15(1). Art.: 18494. DOI: 10.1038/s41598-025-98622-8.
9. Quantifying Contamination Risks: Groundwater Vulnerability Assessment at an MSW Dumpsite with Advanced Profiling Tools / P. Singh, D. K. Haritwal, G. V. Ramana, M. Datta. *Environmental Pollution*. 2025. Vol. 380. Art.: 126522. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.126522.
10. Novakovska I., Belousova N., Hunko L. Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorum*. 2025. Vol. 24(1). P. 129–145. DOI: 10.31648/aspal.9788/.
11. Method of Investigation of Soil Contamination with Heavy Metals at the Sites of Explosions / Didovets Yu., Koloskov V., Bandurian B., Koloskova H. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 988. P. 107–116. DOI: 10.4028/p-n9oeAe.
12. Агрохімічне обстеження сільськогосподарських угідь. Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України». URL: https://iog.gov.ua/land_survey.
13. Kozulia T. V. Theoretical and practical base of methodology for ecological complex estimation of territorial and object systems. Monograph. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2014. 308 p. URL: <https://www.morebooks.de/shop-ui/shop/product/9783639768343>.
14. Kozulia T., Kozulia M., Didmanidze I. Comprehensive study of the systemic formation «object–environment» safety state. *Technogenic and Ecological Safety*. 7(1/2020). P. 3–12. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10749>.
15. Kozulia T. V., Kozulia M. M. Using the systemological basis and information entropy function in the study at uncertainty conditions of system-structured objects. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*. 2022. Vol. 3(139). P. 118–127. DOI: 10.46813/2022-139-118.
16. Kozulia T. The concept of information-entropy space for system objects models building used in sustainable development tasks. *Radio Electronics Computer Science Control*. 2023. Vol 2(65). P. 20–31. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-2-3.
17. Кураєва І. В., Сплідитель А. О. Розподіл важких металів у системі «ґрунт-рослина» в ландшафтах природоохоронних територій. *Геохімія техногенезу. Збірник наукових праць інституту геохімії навколишнього середовища*. 2020. № 3 (31). С. 79–89. DOI: 10.15407/geotech2020.31.079.
18. Free Satellite Imagery Sources: Zoom In Our Planet. URL: <https://eos.com/blog/free-satellite-imagery-sources/>.
19. How to use GIS for Soil Mapping and Crop Monitoring. April 8, 2025. URL: <https://www.mapog.com/soil-mapping-crop-monitoring-gis-tools/>.
20. EOSDA PRODUCTS. Satellite Data Analytics For Daily Earth Insights & Decision-making. URL: <https://eos.com>.
21. Види водних індексів та їх застосування. URL: <https://innoter.com/articles/vidy-vodnykh-indeksiv-i-ikh-primenenie/>.

Kozulia T.

ARBITRARY PROCESSES RESEARCH SYSTEMOLOGY OF SOIL ECOLOGICAL QUALITY RECOVERY AND ANTHROPOGENIC TERRITORIES “SOIL-PLANTS” SYSTEMS

The paper examines complex analysis problems of anthropogenically loaded territories ecological state from ecological systems quality recovery identification point of view. The research was carried out according to proposed natural-anthropogenic complexes objects systemological analysis. The analytical system of research object ecological compliance was planted with complex approach ideology which presents information in the convenient form for analysis and processing. The analytical system itself consists of several systems: “state – process” and “soil – plants”. Every such system detects ecological quality violation separately for research objects according to “object-environment” equilibrium estimation results (research systemology).

The paper proposes to take into account ecological equilibrium violation factors according to ecological compliance esteem results through next procedure: experimental analytical research, statistical analysis, GIS data processing, pollutants entropic functions usage and their participation in transformational changes.

The main practical research results are connected with “state-process” study within “soil” systems of anthropogenically disturbed territories. According to systemological ideology the soil is considered as thermodynamic system with certain environment. The external neighbouring system effects are taken into account along side with internal soil components interactions in such case. System connections and analytical experiments results comparison allowed to determine probable pollutants process transformations within soils. Positive transformational changes are noted in soil systems due to them losing mobility. It is used as basis for claiming possible natural functions self-restoration of anthropogenically loaded territories. Years long research of anthropogenically loaded soils as complex natural systems were used as basis for evidential assessment of pollutants transformational mechanisms in migration flow that advance eliminating equilibrium state violation in soil ecosystem.

Key words: anthropogenic ecological safety, research systemology, anthropogenic factors, ecological conformance control, soil, system modelling, “state – process” entropic function, GIS analysis.

REFERENCES

1. Pro zatverdzhennia Poriadku provedennia monitorynhu zemel i gruntiv [On the approval of the Procedure for monitoring lands and soils]. 848 Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/848-2024-%D0%BF#Text>. [in Ukrainian]
2. Kozulia, T. V., & Kozulia, M. M. (2024). *Informatsiino-metodychni osnovy pidtrymky pryiniattia rishen dla kompleksnoho doslidzhennia systemnykh obiektiv : monohrafiia [Information and methodological foundations for decision support for comprehensive research of systemic objects: monograph]*. Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". Kharkiv: NTU «KhPI». URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79823>; <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/51bd528f-330f-4a59-b030-b7e6db891b6a>. [in Ukrainian]

3. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. *Ekologichnyi monitorynh [Ecological monitoring]*. URL: <https://mepr.gov.ua/topics/novyny/-ekologichnyj-monitoryng-novyny/>. [in Ukrainian]
4. Kamaraj, M., Kiruthika, N., Saranya, T., & Aravind, J. (2025). Bibliometric analysis and impact of heavy metals contamination in soils. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 11(1), 321–342. DOI: 10.22034/gjesm.2025.01.19.
5. Sharafi, S., & Salehi, F. (2025). Comprehensive assessment of heavy metal (HMs) contamination and associated health risks in agricultural soils and groundwater proximal to industrial sites. *Scientific Reports*, 15(1), 7518. DOI: 10.1038/s41598-025-91453-7.
6. Li, Y., Wang, Z., Liu, L., Geng, Y., & Zhang, J. (2025). A combined model method was used to identify the main influencing factors of soil heavy metal pollution sources in Qian river, China. *Scientific Reports*, 15(1), 14040. DOI: 10.1038/s41598-025-98881-5.
7. Bakhshae, A., Babakhani, P., Ashiq, M. M., Bell, K., Salehi, M. & Jazaei, F. (2025). Potential impacts of microplastic pollution on soil–water–plant dynamics. *Scientific Reports*, 15, 9784. DOI: 10.1038/s41598-025-93668-0.
8. Rodríguez-Castrejón, U. E., Serafin-Muñoz, A. H., Álvarez-Vargas, A., Cruz-Jiménez, G., Gutiérrez-Ortega, N. L., Miranda-Avilés, R., & Cano-Canchola, Ma. C. (2025). Assessment of arsenite removal efficiency, resistance, and biotransformation by *Microbacterium hydroxycarbonoxydans* isolated from contaminated sites. *Scientific Reports*, 15(1), 18494. DOI: 10.1038/s41598-025-98622-8.
9. Singh, P., Haritwal, D. K., Ramana, G. V., & Datta, M. (2025). Quantifying Contamination Risks: Groundwater Vulnerability Assessment at an MSW Dumpsite with Advanced Profiling Tools. *Environmental Pollution*, 380, 126522. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.126522.
10. Novakovska, I., Belousova, N., & Hunko, L. (2025). Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum, Administratio Locorum*, 24(1), 129–145. DOI: 10.31648/aspal.9788/.
11. Didovets, Yu., Koloskov, V., Bandurian, B., & Koloskova, H. (2024). Method of Investigation of Soil Contamination with Heavy Metals at the Sites of Explosions. *Key Engineering Materials*, 988, 107–116. DOI: 10.4028/p-n9oeAe.
12. State Institution “Institute of Soil Protection of Ukraine”. *Ahrokhimichne obstezhennia silskohospodarskykh uhid [Agrochemical survey of agricultural land]*. URL: https://iogu.gov.ua/land_survey. [in Ukrainian]
13. Kozulia, T. V. (2014). *Theoretical and practical base of methodology for ecological complex estimation of territorial and object systems. Monograph*. Saarbrücken, Palmarium Academic Publishing. URL: <https://www.morebooks.de/shop-ui/shop/product/9783639768343>.
14. Kozulia, T., Kozulia, M., & Didmanidze, I. (2020). Comprehensive study of the systemic formation «object–environment» safety state. *Technogenic and Ecological Safety*, 7(1/2020), 3–12. URL: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/10749>.
15. Kozulia, T. V., & Kozulia, M. M. (2022). Using the systemological basis and information entropy function in the study at uncertainty conditions of system-structured objects. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, 3(139), 118–127. DOI: 10.46813/2022-139-118.
16. Kozulia, T. (2023). The concept of information-entropy space for system objects models building used in sustainable development tasks. *Radio Electronics Computer Science Control*, 2(65), 20–31. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-2-3.
17. Kuraieva, I.V., Splodytel A. O. (2020). Rozpodil vazhkykh metaliv u systemi “grunt-roslyna” v landshaftakh pryrodookhoronnykh terytorii [Distribution of heavy metals in the “soil-plant” system in the landscapes of nature protection areas]. *Heokhimiia tekhnohenezu. Zbirnyk naukovykh prats instytutu heokhimiï navkolyshnoho seredovyshcha*, 3(31), 79–89. DOI: 10.15407/geotech2020.31.079. [in Ukrainian]
18. *Free Satellite Imagery Sources: Zoom In Our Planet*. URL: <https://eos.com/blog/free-satellite-imagery-sources/>.
19. *How to use GIS for Soil Mapping and Crop Monitoring* (April 8, 2025). URL: <https://www.mapog.com/soil-mapping-crop-monitoring-gis-tools/>
20. EOSDA PRODUCTS. *Satellite Data Analytics For Daily Earth Insights & Decision-making*. URL: <https://eos.com>.
21. *Vydy vodnykh indeksiv ta yikh zastosuvannia [Types of water indices and their application]*. URL: <https://innoter.com/articles/vidy-vodnykh-indeksiv-i-ikh-primenenie/>. [in Ukrainian]