ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ

УДК 574.64:504.064
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.29

ІНДЕКС ХІМІКО-БІОЛОГІЧНОЇ НЕВІДПОВІДНОСТІ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІНТЕГРАЛЬНОГО ЕКОЛОГО-ТОКСИКОЛОГІЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ ҐРУНТІВ

Крайнюков О.М. (orcid.org/0000-0002-5264-3118),
Кривицька І.А. (orcid.org/0009-0004-9543-7076),
Філатов В.М. (orcid.org/0009-0004-9102-7686)
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майд. Свободи, 4, 61022, м. Харків
alkraynukov@gmail.com

У даному дослідженні проведено комплексну оцінку забруднення ґрунтів важкими металами та їхнього біологічного впливу з використанням хімічних і фітотоксикологічних показників. Сучасні підходи до оцінювання екологічного стану ґрунтів переважно ґрунтуються на визначенні концентрацій забруднювальних речовин та їх зіставленні з нормативними або фоновими значеннями. Водночас фактичний біологічний ефект забруднення залежить не лише від вмісту важких металів, а й від їхньої рухомості, біодоступності, властивостей ґрунтового середовища та особливостей реакції живих організмів. У зв'язку з цим однаковий або близький рівень хімічного навантаження може супроводжуватися різною інтенсивністю біологічної відповіді, що обмежує можливості оцінювання екологічного ризику виключно за результатами інструментального аналізу. Для дослідження цього явища визначено вміст рухомих форм Pb, Cd, Cr, Cu, Zn і Ni у ґрунтах досліджуваних територій та проведено фітотестування з використанням Raphanus sativus L. як тест-об'єкта. Біологічну реакцію оцінювали за інгібуванням росту коренів і надземної частини рослин. Для кількісного зіставлення різнорозмірних хімічних і біологічних показників запропоновано їх стандартизацію та формування інтегрованого хімічного сигналу і інтегрованої біологічної відповіді. На цій основі розроблено індекс хіміко-біологічної невідповідності (ІХБН), який характеризує величину та напрям розходження між рівнем хімічного навантаження і фактичною реакцією тест-організму. Встановлено, що підвищений вміст важких металів у ґрунті не в усіх випадках супроводжується пропорційним посиленням фітотоксичного ефекту. Найбільш виражену невідповідність виявлено для ґрунтів території Мирного, де за високого інтегрованого хімічного сигналу спостерігалася відносно слабка біологічна реакція, особливо за показником інгібування росту коренів. Отримані результати підтверджують доцільність спільного використання інструментальних та біотестових методів і свідчать, що саме ступінь розходження між ними може виступати додатковою діагностичною характеристикою стану забрудненого ґрунту. Запропонований ІХБН розширює можливості інтегрального еколого-токсикологічного оцінювання та може бути використаний для виявлення територій, на яких результати хімічного аналізу не повною мірою відображають фактичний біологічний ефект забруднення, а також для обґрунтування пріоритетів подальшого моніторингу та відновлення порушених ґрунтових екосистем. *Ключові слова:* важкі метали, забруднення ґрунтів, еколого-токсикологічна оцінка, фітотоксичність, Raphanus sativus L., біотестування, біологічна відповідь, хімічне навантаження, біодоступність, індекс хіміко-біологічної невідповідності (ІХБН).

Chemical–biological discrepancy index as a tool for integrated ecotoxicological assessment of soils. Krainiukov O., Kryvytska I., Filatov V.

This study presents a comprehensive assessment of soil contamination with heavy metals and their biological effects using chemical and phytotoxicological indicators. Current approaches to assessing the ecological condition of soils are predominantly based on determining pollutant concentrations and comparing them with regulatory or background values. However, the actual biological effects of contamination depend not only on heavy metal concentrations but also on their mobility, bioavailability, soil properties, and the specific responses of living organisms. Consequently, identical or similar levels of chemical load may be accompanied by different intensities of biological response, which limits the assessment of ecological risk based solely on instrumental analysis. To investigate this phenomenon, the concentrations of mobile forms of Pb, Cd, Cr, Cu, Zn, and Ni were determined in soils from the studied areas, and phytotoxicity testing was performed using Raphanus sativus L. as a test organism. The biological response was assessed based on the inhibition of root and shoot growth. To quantitatively compare chemical and biological indicators expressed in different units, their standardization and the calculation of an integrated chemical signal and an integrated biological response were proposed. On this basis, the Chemical–Biological Discrepancy Index (CBDI) was developed to characterize the magnitude and direction of the discrepancy between the level of chemical load and the actual response of the test organism. The results demonstrated that elevated concentrations of heavy metals in soil were not always accompanied by a proportional increase in phytotoxic effects. The most pronounced discrepancy was identified in the soils of the Myrne area, where a high integrated chemical signal was accompanied by a relatively weak biological response, particularly in terms of root growth inhibition. The findings confirm the value of combining instrumental analysis with biotesting methods and indicate that the degree of discrepancy between chemical and biological assessments may serve as an additional diagnostic characteristic of contaminated soils. The proposed CBDI expands the possibilities of integrated ecotoxicological assessment and may be used to identify areas where chemical analysis does not fully reflect the actual biological effects of contamination, as well as to support the prioritization of further monitoring and restoration of disturbed soil ecosystems. *Key words:* heavy metals, soil contamination, ecotoxicological assessment, phytotoxicity, Raphanus sativus L., biotesting, biological response, chemical load, bioavailability, Chemical–Biological Discrepancy Index (CBDI).

© Крайнюков О.М., Кривицька І.А., Філатов В.М., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Ґрунт є одним із найважливіших природних ресурсів, від стану якого безпосередньо залежать функціонування наземних екосистем, сільськогосподарське виробництво та безпека людини. Інтенсивний розвиток сільського господарства, промисловості й урбанізаційних процесів супроводжується зростанням антропогенного навантаження на ґрунтовий покрив, унаслідок чого проблема його забруднення набуває дедалі більшого значення [1, 2]. Особливу небезпеку становить накопичення важких металів, випадки значного забруднення якими реєструються в різних регіонах світу. Стійкість цих елементів у навколишньому середовищі, здатність накопичуватися у ґрунтах і залучатися до біогеохімічних процесів перетворюють металеве забруднення на одну з актуальних екологічних проблем сучасності [3, 4].

Надмірний вміст важких металів може змінювати перебіг процесів трансформації та кругообігу поживних речовин у ґрунті [5], негативно впливати на ріст і розвиток рослин, знижувати врожайність сільськогосподарських культур та погіршувати якість отриманої продукції [6]. Забруднені ґрунти водночас можуть бути джерелом надходження металів до організму людини. Експозиція відбувається внаслідок безпосереднього контакту із ґрунтовими частинками, їх інгаляційного надходження [7], а також опосередковано – через перенесення металів у системі «ґрунт–рослина–тварина–людина» та їх включення до харчових ланцюгів [8].

Присутність металів у ґрунтах не завжди є наслідком антропогенного забруднення. За природних умов їх вміст значною мірою визначається мінералогічним і геохімічним складом ґрунтотворних порід [9]. Метали природного походження часто перебувають у малорухомих і важкодоступних для рослин формах, тому пов'язаний із ними екологічний ризик може бути порівняно невисоким [10]. Водночас господарська діяльність людини істотно змінює природний баланс цих елементів. Застосування мінеральних добрив і засобів захисту рослин, промислові викиди, видобування та перероблення сировини, транспортне навантаження й інші антропогенні процеси сприяють додатковому надходженню металів та їх накопиченню у верхніх горизонтах ґрунту [11]. Антропогенна складова забруднення має особливе значення, оскільки частина таких сполук характеризується підвищеною рухомістю та біодоступністю, що полегшує їх надходження до рослин і підвищує потенційний екологічний ризик.

Неоднорідність природних умов і різна інтенсивність антропогенного навантаження формують значну просторову мінливість вмісту важких металів у ґрунтах. Тому сучасні дослідження спрямовані не лише на визначення їх концентрацій, а й на встановлення походження забруднення, оцінювання внеску окремих джерел та виявлення чинників, які визначають просторовий розподіл металів. Протягом останнього десятиліття ці питання активно досліджуються в різних країнах, що дозволило сформувати широкий спектр підходів до аналізу джерел і закономірностей поширення металевого забруднення [12–17].

Для кількісної характеристики стану ґрунтів широко використовують систему геохімічних та екологічних індексів. До найбільш поширених належать фактор збагачення, індекс геоакумуляції та індекс потенційного екологічного ризику, які дають змогу оцінити ступінь накопичення окремих елементів і потенційну небезпеку їх присутності у ґрунті [18]. Водночас важливим напрямом досліджень залишається встановлення джерел надходження забруднювачів. Такі дослідження передбачають як ідентифікацію ймовірних джерел, так і кількісне визначення внеску кожного з них у формування загального рівня забруднення.

Для встановлення походження важких металів застосовують кластерний аналіз, метод головних компонентів [19], просторовий аналіз із використанням геоінформаційних технологій [20] та інші статистичні підходи. Кількісний розподіл внеску окремих джерел здійснюють за допомогою рецепторних моделей, зокрема позитивної матричної факторизації та балансу хімічної маси, а для визначення просторових закономірностей і впливу окремих чинників використовують географічний детектор та споріднені методи [4, 21–23]. Поєднання багатовимірного статистичного аналізу з геостатистичними моделями [24] істотно розширило можливості дослідження просторової диференціації забруднення та встановлення його ймовірних джерел.

Разом із тим індексна оцінка та аналіз концентрацій переважно характеризують хімічну складову забруднення і не завжди дають можливість безпосередньо судити про фактичний біологічний ефект присутніх у ґрунті металів. Різна рухомість і біодоступність елементів, властивості ґрунтового середовища та взаємодія компонентів поліелементного забруднення можуть зумовлювати ситуації, коли вираженість біологічної реакції не відповідає рівню хімічного навантаження. У зв'язку з цим перспективним є поєднання результатів хімічного аналізу з біотестуванням та розроблення інтегральних підходів, здатних характеризувати не лише рівень забруднення, а й ступінь узгодженості між хімічним сигналом і фактичною реакцією біологічних об'єктів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський науковий доробок безпосередньо пов'язаний із розв'язанням актуальних завдань у сфері екологічної безпеки, моніторингу стану довкілля та забезпечення сталого природокористування. Проведені дослідження спрямовані на вдосконалення підходів до оцінювання якості поверхневих вод і ґрунтів, визначення рівнів та джерел техногенного забруднення, дослідження міграції й біологічної доступності токсичних компонентів, а також

встановлення їхнього впливу на живі організми та екосистеми. Особливе значення має поєднання інструментальних методів контролю з біотестуванням та інтегральним оцінюванням екологічного стану, що дає змогу перейти від констатації факту забруднення до комплексного визначення його реальної екологічної небезпеки. Практична спрямованість отриманих результатів полягає у можливості їх використання для вдосконалення систем екологічного моніторингу, обґрунтування природоохоронних і відновлювальних заходів, прийняття управлінських рішень щодо забруднених та порушених територій і зниження екологічних ризиків. У сучасних умовах, коли техногенне навантаження посилюється наслідками воєнних дій, такий напрям досліджень набуває особливої актуальності для відновлення територій України, збереження природно-ресурсного потенціалу та забезпечення екологічної безпеки населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних дослідженнях еколого-токсикологічного стану ґрунтів дедалі більше уваги приділяється не стільки встановленню самого факту присутності важких металів, скільки визначенню їх рухомості, біодоступності та здатності спричиняти біологічні ефекти [25-28]. Це пов'язано з тим, що концентраційні показники характеризують рівень хімічного навантаження, проте не завжди дозволяють прогнозувати фактичну реакцію живих організмів. Вміст металу у ґрунті та ступінь його токсичної дії можуть суттєво відрізнятися залежно від форми знаходження елемента, властивостей ґрунтового середовища та взаємодії з іншими компонентами забруднення. Тому одним із провідних напрямів сучасних досліджень стає пошук підходів, які дають змогу зіставляти результати хімічного аналізу з показниками біологічної відповіді.

Одним із ключових питань сучасної екотоксикології залишається співвідношення між концентрацією металу в ґрунті та його біологічною доступністю. У дослідженні Kim et al. [28] наголошено на необхідності врахування біодоступності металів під час оцінювання забруднених ґрунтів. Важливу роль відіграють кислотність, гранулометричний склад, вміст органічної речовини, сорбційні властивості та конкурентні взаємодії між елементами. Тому однакові концентрації металів у різних ґрунтах можуть супроводжуватися неоднаковою біологічною реакцією.

Ця проблема зумовила активний розвиток біологічних методів контролю, які дають можливість оцінити сумарний ефект комплексу забруднювачів без необхідності встановлення внеску кожного компонента окремо. Для ґрунтів використовують тест-системи на основі рослин, ґрунтових безхребетних, мікроорганізмів та ферментативної активності. Рослинні біотести становлять особливий інтерес завдяки чутливості ростових процесів до токсичного впливу та можливості безпосередньо оцінювати реакцію продуцентів на властивості забрудненого субстрату.

Водночас результати хімічного аналізу та біотестування не завжди демонструють однакову оцінку екологічного стану ґрунту. Високий рівень накопичення забруднювача може поєднуватися з порівняно слабким біологічним ефектом, тоді як за менш вираженого хімічного забруднення реакція тест-організмів іноді виявляється значнішою. Такі відмінності можуть бути пов'язані з біодоступністю сполук, синергічними або антагоністичними взаємодіями компонентів забруднення, особливостями ґрунтового середовища та різною чутливістю біологічних об'єктів. Саме тому використання лише концентраційних критеріїв або лише результатів біотестування може призводити до неповної характеристики екологічної небезпеки.

Спробою подолання зазначеного обмеження стало впровадження концепцій Weight of Evidence (WoE) та TRIAD, які передбачають спільне використання декількох незалежних ліній доказів. У межах таких підходів хімічні характеристики забруднення поєднуються з результатами екотоксикологічних тестів та показниками фактичного стану біоти. Semenzin et al. запропонували інтегрувати дані щодо біодоступності, екотоксикологічних ефектів та екологічного стану в систему індексів ризику для забруднених ґрунтів. Такий підхід дозволяє отримати більш обґрунтовану оцінку, ніж використання окремої групи показників [29].

Подальший розвиток цього напряму пов'язаний із використанням інтегральних біомаркерних показників. Зокрема, Deville-Cavellin et al. [30] досліджували можливості застосування інтегрованих біомаркерів для оцінювання екологічного ризику за умов комплексного забруднення ґрунтів металами та металоїдами. Такий підхід дозволяє узагальнювати різні прояви біологічної відповіді та доповнювати результати хімічного аналізу інформацією про фактичні ефекти забруднення.

Рослинні біотести становлять особливий інтерес завдяки чутливості ростових процесів до токсичного впливу та можливості безпосередньо оцінювати реакцію продуцентів на властивості досліджуваного субстрату. Зокрема, Bhat et al. [31] досліджували фітотоксичність важких металів щодо *Raphanus sativus* L. у ґрунті з додаванням обробленого осаду, що підтверджує доцільність використання цього виду як тест-об'єкта для оцінювання впливу металевого забруднення.

Таким чином, аналіз сучасних досліджень свідчить про поступове формування комплексної парадигми оцінювання забруднених ґрунтів, у якій хімічні та біологічні методи розглядаються як взаємодоповнювальні. Водночас більшість існуючих інтегральних підходів спрямована насамперед на агрегування різних груп показників у загальну оцінку забруднення або екологічного ризику. Значно

менше уваги приділяється кількісній характеристиці самої невідповідності між рівнем хімічного навантаження та вираженістю фактичної біологічної реакції. Визначення величини та спрямованості такого розходження може надати додаткову інформацію про біодоступність забруднювачів, особливості їх комбінованої дії та специфіку реакції біологічних систем. Саме це обґрунтовує доцільність розроблення індексу хіміко-біологічної невідповідності як додаткового інструменту інтегрального еколого-токсикологічного оцінювання ґрунтів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значний розвиток методів еколого-токсикологічного оцінювання ґрунтів, недостатньо дослідженим залишається питання кількісної характеристики розбіжностей між результатами інструментального аналізу та реакцією біологічних об'єктів. Наявні підходи переважно орієнтовані на визначення рівня забруднення, потенційного екологічного ризику або формування узагальненої оцінки на основі сукупності різнорідних параметрів. При цьому ситуації, коли значне хімічне навантаження супроводжується слабкою відповіддю тест-організму або, навпаки, відносно невисокі концентрації забруднювачів викликають виражений біологічний ефект, здебільшого розглядаються як особливості окремих досліджень, а не як самостійна діагностична ознака стану ґрунтової системи. Недостатньо розробленими залишаються критерії, які дозволяли б чисельно визначити величину такого розходження, встановити його спрямованість та забезпечити коректне зіставлення показників, виражених у різних одиницях вимірювання. У зв'язку з цим актуальним є розроблення інструменту, здатного характеризувати ступінь відповідності фактичного біологічного відгуку рівню встановленого хімічного навантаження, що створює основу для більш диференційованої інтерпретації еколого-токсикологічного стану ґрунтів.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає у розробленні підходу, за якого розбіжність між хімічними характеристиками забруднення ґрунту та реакцією тест-організму розглядається як окрема інформативна властивість досліджуваної системи. Запропоновано індекс хіміко-біологічної невідповідності (ІХБН), призначений для чисельного відображення величини та спрямованості відхилення біологічного відгуку від рівня, сформованого сукупністю хімічних показників. Методичне рішення передбачає приведення різнорозмірних параметрів до зіставного масштабу, формування інтегрального хімічного сигналу та його подальше співвіднесення з нормованими показниками біологічної відповіді. Принциповою особливістю ІХБН є збереження знака розбіжності, завдяки чому стає можливим розрізняти випадки переважання хімічного навантаження над проявленим біологічним ефектом, їх відносної узгодженості або, навпаки, посиленої реакції біологічної системи за менш вираженого хімічного сигналу. Такий підхід розширює можливості інтерпретації результатів еколого-токсикологічних досліджень і створює методичне підґрунтя для диференціації ґрунтів не лише за рівнем забруднення, а й за характером реалізації його біологічної дії.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення роботи полягає у формуванні нового способу інтерпретації даних еколого-токсикологічних досліджень, за якого основним об'єктом аналізу стає не окремий показник, а характер співвідношення між різними проявами стану ґрунтової системи. Запропонована методологія забезпечує перехід від паралельного представлення результатів лабораторних досліджень до їх математично формалізованого зіставлення в єдиному аналітичному просторі. Це створює можливість виявляти приховані закономірності, які залишаються непомітними за традиційного розгляду окремих масивів даних, установлювати типи реакції ґрунтових систем на антропогенний вплив та порівнювати різні за складом і походженням об'єкти за уніфікованим принципом. Загальнонаукове значення такого підходу полягає також у можливості його подальшої адаптації до інших компонентів довкілля, наборів забруднювачів і тест-організмів, що відкриває перспективи для створення універсальніших систем екологічної діагностики та прогнозування змін природних і техногенно трансформованих екосистем.

Викладення основного матеріалу. Емпіричною основою для апробації запропонованого підходу стали результати еколого-токсикологічного дослідження ґрунтів агроландшафтів Харківської області, частина яких зазнала безпосереднього воєнного впливу. До аналізу включено ділянки поблизу с. Хрестище, с. Мирне та с. Оленівка, а як референтну територію використано орні землі поблизу с. Українка, для яких не було встановлено безпосереднього впливу вибухів. Така організація дослідження дала можливість зіставити території з різним характером впливу в межах одного регіону та використати локальний референтний рівень для подальших розрахунків. Відбір зразків здійснено 17 липня 2026 року.

Хімічну складову оцінювання формували за вмістом рухомих форм Pb, Cd, Cr, Cu, Zn та Ni. Вибір саме рухомих форм зумовлений їх більшою екологічною інформативністю порівняно з валовим вмістом, оскільки ця фракція характеризує потенційно мобільну та біодоступну частину металів у ґрунтовому середовищі. Отримані концентрації порівнювали з нормативними значеннями ГДК, а для встановлення локальних особливостей накопичення – із концентраціями відповідних елементів на референтній ділянці.

Біологічну складову дослідження визначали методом фітотестування з використанням Raphanus

sativus L. Тривалість експозиції становила 96 годин, а для кожного дослідного варіанта та контролю аналізували по 30 рослин. Як тест-реакції використовували довжину кореневої системи та надземної частини проростків із подальшим визначенням величини їх пригнічення відносно контролю. Застосування двох морфометричних характеристик дозволило врахувати можливу неоднакову чутливість окремих частин рослини до властивостей досліджуваного субстрату.

Результати хімічного аналізу засвідчили поліелементний характер забруднення. Найбільш виражене перевищення нормативного рівня встановлено для Cu: на трьох ділянках, що зазнали воєнного впливу, його концентрація становила 24–29 мг/кг за ГДК 3 мг/кг, тобто перевищення сягало 8,0–9,7 раза. Вміст Cd перевищував норматив у 1,7–2,7 раза, Cr – у 1,8–2,5 раза, а Zn – приблизно у 1,6–1,8 раза. Для Ni особливо вирізнялося с. Мирне, де концентрація становила 12 мг/кг, або 3 ГДК. Концентрація Pb на територіях воєнного впливу досягала 19–22 мг/кг за нормативного рівня 6 мг/кг.

Порівняння з локальною референтною територією дозволило виявити іншу важливу характеристику – ступінь відносного збагачення ґрунтів. Найбільші відмінності встановлено для Cd, вміст якого перевищував референтний рівень у 4,0–6,3 раза. Для Cr коефіцієнти становили 2,75–3,75, Cu – 2,67–3,22, Pb – 2,38–2,75, тоді як для Zn – 1,85–2,05. Найбільш контрастною просторовою поведінкою характеризувався Ni: у с. Мирне його концентрація була в чотири рази вищою за референтну. Отже, саме ця ділянка мала найбільш виражений комплексний профіль збагачення металами.

Результати фітотестування, однак, не відтворювали встановлену хімічну диференціацію буквально. За пригніченням росту надземної частини R. sativus найбільший ефект спостерігався для ґрунту с. Оленівка – 24,16 %, тоді як у с. Хрестище та с. Мирне він становив відповідно 20,95 і 20,61 %. Для референтної ділянки цей показник дорівнював лише 4,39 %. Іншу картину отримано за реакцією кореневої системи: у с. Хрестище пригнічення становило 16,49 %, у с. Оленівка – 18,25 %, на референтній ділянці – 16,84 %, тоді як у с. Мирне воно дорівнювало лише 2,18 %.

Саме результат, отриманий для с. Мирне, є показовим з позицій подальшого інтегрального аналізу. Ділянка характеризувалася максимальними або одними з найвищих концентрацій Pb, Cd, Cu та Ni, однак реакція кореневої системи тест-рослини виявилася найменшою серед усіх досліджених варіантів. Натомість у с. Оленівка максимальний вміст Cr поєднувався з найбільшим пригніченням надземної частини рослин. Таким чином, однаковий принцип інтерпретації лише за абсолютним рівнем хімічного навантаження не забезпечує повного пояснення фактичної біологічної відповіді.

Для приведення хімічних і біологічних параметрів, виражених у різних одиницях, до єдиного масштабу було використано Z-стандартизацію. Для кожного показника визначали відхилення індивідуального значення від середнього з урахуванням стандартного відхилення. У результаті абсолютні концентрації металів та відсоткові значення фітотоксичного ефекту перетворювалися на безрозмірні величини, придатні для безпосереднього зіставлення. Z-оцінки при цьому використовували як засіб нормування та порівняльної характеристики, а не як критерій статистичної значущості.

Стандартизовані профілі підтвердили відсутність повної синхронності між двома групами параметрів. Особливо чітко це проявилося для с. Мирне: позитивні Z-оцінки більшості металів поєднувалися з різко відмінним профілем кореневої реакції. Водночас показник пригнічення надземної частини краще відокремлював три території воєнного впливу від референтної. Отже, отриманий масив даних демонструє не просто різницю між результатами двох методів дослідження, а різний ступінь їх узгодженості залежно від конкретної ділянки та обраної біологічної тест-реакції.

Представлена схема стала методичною основою для формалізації виявленого розходження та розроблення індексу хіміко-біологічної невідповідності (ІХБН). Індекс призначений для кількісного оцінювання співвідношення між інтегральним хімічним навантаженням і фактичною фітотоксичною реакцією (рис. 1).

На першому етапі хімічні та біологічні показники стандартизували за Z-оцінками. Така процедура усуває вплив різних одиниць вимірювання та переводить усі параметри у безрозмірну форму:

$$Z_{ij} = (x_{ij} - \bar{x_j}) / s_j, \quad (1)$$

де x_{ij} – значення j-го показника для і-ї досліджуваної ділянки; $\bar{x_j}$ – середнє значення відповідного показника для сукупності ділянок; s_j – стандартне відхилення. У цьому розрахунку стандартизацію виконано в межах сукупності чотирьох досліджуваних ділянок.

Інтегральний хімічний сигнал H_i визначали як середнє арифметичне Z-оцінок рухомих форм шести металів – Pb, Cd, Cr, Cu, Zn та Ni:

$$H_i = (1/m) \Sigma Z_{ij(chem)}, \quad (2)$$

Інтегральний біологічний сигнал B_i формували за двома морфометричними тест-реакціями *Raphanus sativus* L. – пригніченням росту кореневої системи та надземної частини:

$$B_i = (Z_i,root + Z_i,shoot) / 2, \quad (3)$$

Оскільки в обох випадках збільшення стандартизованого значення відповідає посиленню відповідного сигналу – металевого навантаження або фітотоксичного ефекту – їх можна безпосередньо

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

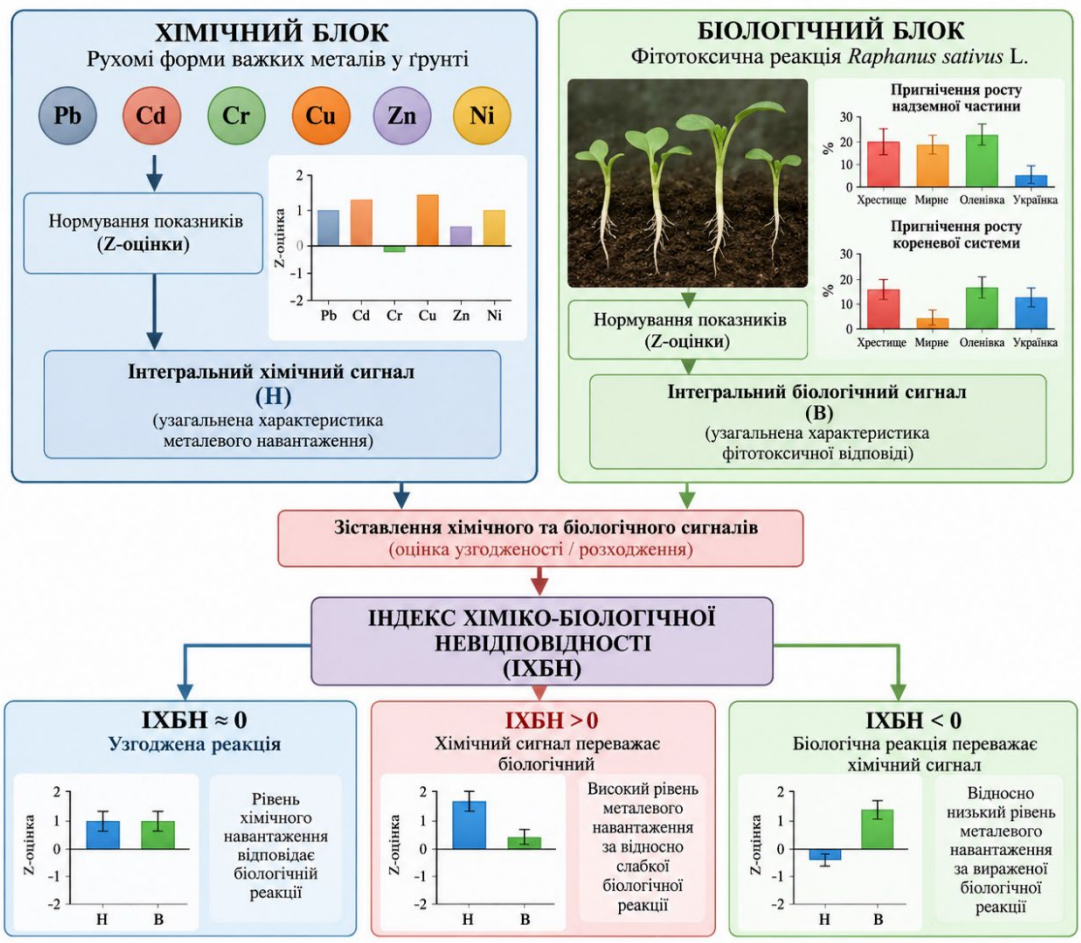

Рис. 1. Концептуальна схема інтегрованого зіставлення хімічного навантаження та біологічної відповіді ґрунтової системи як основи визначення індексу хіміко-біологічної невідповідності (ІХБН)

зіставляти. Індекс хіміко-біологічної невідповідності визначали як різницю:

$$ІХБН_i = H_i - B_i, \quad (4)$$

Запропонований індекс хіміко-біологічної невідповідності ґрунтується на принципі порівняння двох незалежно сформованих груп показників, які характеризують різні аспекти еколого-токсикологічного стану ґрунтової системи. Інтегральний хімічний сигнал відображає відносну інтенсивність поліелементного забруднення, тоді як інтегральний біологічний сигнал характеризує фактичну фітотоксичну реакцію тест-організму. Визначення різниці між цими сигналами дає змогу не лише встановити ступінь їх розходження, а й ідентифікувати його спрямованість, що становить основну діагностичну особливість запропонованого підходу.

Використання Z-стандартизації забезпечує приведення хімічних і біологічних показників до безрозмірного масштабу з урахуванням їх варіабельності в досліджуваній сукупності. Водночас така процедура не означає еквівалентності токсикологічної небезпеки окремих металів або однакової екологічної значущості біологічних реакцій. Тому ІХБН слід розглядати як відносний порівняльний показник, який характеризує особливості співвідношення хімічного навантаження та біологічної відповіді в межах визначеної сукупності досліджуваних об'єктів.

Застосування однакових вагових коефіцієнтів для окремих хімічних показників обумовлено необхідністю уникнення додаткової суб'єктивності на початковому етапі апробації індексу. Такий підхід дозволяє оцінити узагальнений характер хімічного сигналу без попереднього встановлення пріоритетності окремих металів. Разом із тим подальше вдосконалення ІХБН передбачає можливість використання диференційованих вагових коефіцієнтів, обґрунтованих токсикологічними характеристиками забруднювачів та особливостями їх біологічної дії.

Знак ІХБН відображає спрямованість розходження. Значення, близьке до нуля, свідчить про відносну узгодженість двох сигналів; додатне значення означає переважання хімічного сигналу над біологічним, а від'ємне – відносно сильнішу біоло-

гічну реакцію. Для характеристики лише сили розходження, незалежно від його напряму, додатково використовували модуль індексу |ІХБН|.

Розрахунок проведено за фактичними концентраціями рухомих форм Pb, Cd, Cr, Cu, Zn і Ni та показниками пригнічення росту кореневої системи і надземної частини *Raphanus sativus* L. для ґрунтів с. Хрестище, с. Мирне, с. Оленівка та референтної ділянки поблизу с. Українка (табл.1, рис. 2).

Найменша абсолютна невідповідність встановлена для ґрунту с. Хрестище (ІХБН = −0,121; |ІХБН| = 0,121), де інтегральні хімічний і біологічний сигнали були найбільш близькими. Для с. Мирне отримано найбільше додатне значення ІХБН (1,516). Високий інтегральний хімічний сигнал H = 0,855 тут поєднувався з від'ємним інтегральним біологічним сигналом B = −0,662, що кількісно відображає встановлене раніше розходження між значним металевим навантаженням і слабкою реакцією кореневої системи.

Для с. Оленівка ІХБН становив −0,460: біологічний сигнал (B = 0,798) перевищував інтегральний хімічний (H = 0,339), що узгоджується з найбільш вираженим пригніченням надземної частини тест-рослин. На референтній ділянці поблизу с. Українка отримано ІХБН = −0,936. Таке значення сформувалося на тлі найнижчого інтегрального хімічного сигналу (H = −1,528) та відносно менш негативного біологічного сигналу (B = −0,592), зокрема через збереження помітної реакції кореневої системи.

Принципова відмінність запропонованого ІХБН від традиційних інтегральних показників забруднення полягає у спрямованості не на узагальнення хімічного та біологічного навантаження в єдину оцінку, а на кількісне визначення характеру їх співвідношення. За такого підходу розходження між результатами інструментального аналізу та біотестування розглядається як самостійна діагностична характеристика ґрунтової системи. Це дозволяє виділяти об'єкти, для яких оцінка екологічного стану виключно за концентраційними показниками може бути недостатньою.

Найбільш показовими є результати дослідження ґрунтів поблизу с. Мирне, де значення ІХБН становило 1,516 за високого інтегрального хімічного сигналу (H = 0,855) та від'ємного біологічного сигналу (B = −0,662). Така комбінація свідчить про відносно слабшу фітотоксичну реакцію порівняно з рівнем хімічного навантаження в досліджуваній сукупності. Виявлена невідповідність може бути пов'язана з особливостями доступності металів для тест-організму, фізико-хімічними властивостями ґрунту або взаємодією компонентів забруднення. Водночас встановлення конкретних механізмів формування такої реакції потребує додаткових експериментальних досліджень.

Таблиця 1

Результати розрахунку інтегральних сигналів та ІХБН

Ділянка	H	B	ІХБН	|ІХБН|
Хрестище	0,335	0,455	-0,121	0,121
Мирне	0,855	-0,662	1,516	1,516
Оленівка	0,339	0,798	-0,460	0,460
Українка	-1,528	-0,592	-0,936	0,936

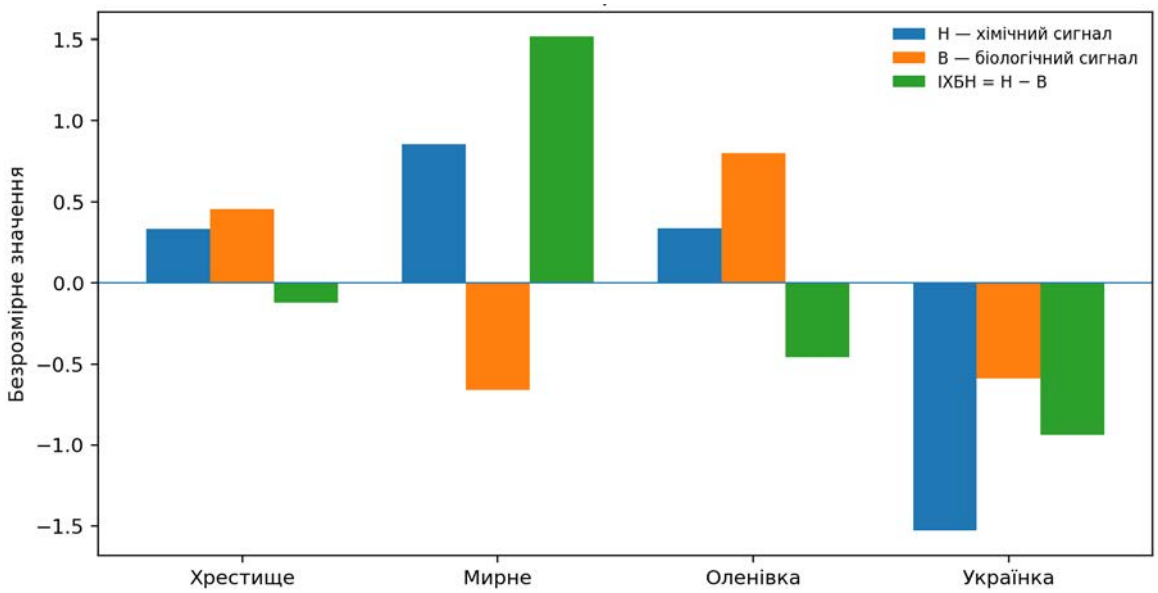

Рис. 2. Співвідношення інтегрального хімічного сигналу H, біологічного сигналу B та ІХБН для досліджуваних ділянок

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

Необхідно враховувати, що отримані значення ІХБН залежать від складу досліджуваної вибірки, оскільки стандартизація показників здійснюється за середніми значеннями та стандартними відхиленнями, визначеними для відповідної сукупності об'єктів. У зв'язку з цим зміна кількості або характеристик досліджуваних ділянок потенційно може впливати на величину інтегральних сигналів та результуючого індексу. Це обмежує можливість безпосереднього порівняння абсолютних значень ІХБН, отриманих у незалежних дослідженнях із різними вибірками.

Подальша методична валідація запропонованого індексу має передбачати оцінювання його чутливості до зміни складу вибірки, способів стандартизації, вагових коефіцієнтів та набору біологічних тест-реакцій. Окремого значення набуває встановлення статистичної невизначеності ІХБН з урахуванням варіабельності експериментальних показників. Залучення додаткових тест-організмів і незалежних наборів даних дозволить визначити стійкість запропонованого підходу та обґрунтувати можливість його ширшого використання в системах еколого-токсикологічного моніторингу.

Головні висновки. Отримані результати підтверджують, що ІХБН дає змогу чисельно виділити випадки, у яких хімічна та біологічна складові формують різноспрямовані еколого-токсикологічні профілі. Водночас запропонований індекс на цьому етапі слід розглядати як порівняльний дослідницький показник. Установлення універсальних порогових значень і класів невідповідності потребує апробації на ширшій вибірці ґрунтів, різних рівнях забруднення та додаткових тест-об'єктах.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективи використання отриманих результатів пов'язані насамперед із практичною апробацією індексу хіміко-біологічної невідповідності (ІХБН) як додаткового інструменту еколого-токсикологічної діагностики ґрунтів. Запропонований підхід може бути корисним для виявлення територій, де рівень хімічного навантаження не відповідає вираженості фактичної біологічної реакції, що має особливе значення за комплексного забруднення та неоднакової біодоступності окремих компонентів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на перевірку ІХБН на розширеній вибірці ґрунтів із різним рівнем і походженням техногенного навантаження, залучення додаткових тест-організмів і біологічних показників, а також встановлення статистично обґрунтованих діапазонів його інтерпретації. Перспективним є застосування запропонованого принципу не лише для важких металів, а й для інших груп забруднювачів та їх сумішей, а надалі – його адаптація до оцінювання інших компонентів довкілля. Практична реалізація такого підходу може доповнити традиційний хімічний моніторинг інформацією про характер реалізації токсичного впливу та сприяти більш обґрунтованому визначенню пріоритетності рекультиваційних, ремедіаційних і моніторингових заходів на техногенно трансформованих територіях.

Література

1. Tepanosyan G., Sahakyan L., Belyaeva O., Asmaryan S., Saghatelyan A. Continuous impact of mining activities on soil heavy metals levels and human health. Science of the Total Environment, 2018. Vol. 639. pp. 900–909. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.211
2. Ding Q., Cheng G., Wang Y., Zhuang D. Effects of natural factors on the spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions. Science of the Total Environment, 2017. Vol. 578. pp. 577–585. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.001
3. Niu L., Yang F., Xu C., Yang H., Liu W. Status of metal accumulation in farmland soils across China: From distribution to risk assessment. Environmental Pollution, 2013. Vol. 176. pp. 55–62. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.019
4. Gong C., Lu H., Zhang Z., Wang L., Xia X., Wang L., Xiang Z., Shuai L., Ding Y., Chen Y., Wang S. Spatial distribution characteristics of heavy metal(loid)s health risk in soil at scale on town level. Scientific Reports, 2022. Vol. 12. Art. 19195. https://doi.org/10.1038/s41598-022-20867-4
5. Karimyan K., Alimohammadi M., Maleki A., Yunesian M., Nabizadeh Nodehi R., Rahimi Foroushani A. Human health and ecological risk assessment of heavy metal(loid)s in agricultural soils of rural areas: A case study in Kurdistan Province, Iran. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2020. Vol. 18(2). pp. 469–481. https://doi.org/10.1007/s40201-020-00475-y
6. Yang Q., Li Z., Lu X., Duan Q., Huang L., Bi J. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. Science of the Total Environment, 2018. Vol. 642. pp. 690–700. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.068
7. Huang Y., Chen Q., Deng M., Japenga J., Li T., Yang X., He Z. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China. Journal of Environmental Management, 2018. Vol. 207. pp. 159–168. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.072
8. Li Z., Li W., Lei J., Li Q., Liu L., Zhou L. Effect and hazard of common metal elements on human body. Materials China, 2020. Vol. 39(12). pp. 934–944. https://doi.org/10.7502/j.issn.1674-3962.202003018
9. Zhang C., Qian J., Lei Y., Nie J., Ma J., Zhang J. Sources of heavy metal pollution and risk assessment of soil in watermelon planting areas in Kaifeng City. Environmental Chemistry, 2021. Vol. 40(6). pp. 1714–1722. https://doi.org/10.7524/j.issn.0254-6108.2020013002
10. De Temmerman L., Vanongeval L., Boon W., Hoenig M., Geypens M. Heavy metal content of arable soils in Northern Belgium. Water, Air, and Soil Pollution, 2003. Vol. 148. pp. 61–76. https://doi.org/10.1023/A:1025498629671

11. Li P., Huang Y., Lin Y., Hua P. X., Yuan G. L. Distribution, source identification and risk assessment of heavy metals in topsoil of Huairou District in Beijing. Geoscience, 2018. Vol. 32. pp. 86–94. https://doi.org/10.19657/j/geoscience.1000-8527.2018.01.08
12. Xiao Y., Guo M., Li X., Luo X., Pan R., Ouyang T. Spatial distribution, pollution, and health risk assessment of heavy metal in agricultural surface soil for the Guangzhou-Foshan urban zone, South China. PLOS ONE, 2020. Vol. 15(10). Art. e0239563. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239563
13. Wieczorek J., Baran A., Bubak A. Mobility, bioaccumulation in plants, and risk assessment of metals in soils. Science of the Total Environment, 2023. Vol. 882. Art. 163574. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163574
14. Yang A., Wang Y., Hu J., Liu X., Li J. Evaluation and source of heavy metal pollution in surface soil of Qinghai-Tibet Plateau. Environmental Science, 2020. Vol. 41. pp. 886–894. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.201907195
15. Bo L. J., Li B., Zhang R. Q., Li Y. P., Li Y., Duan G., Gao X. H. Characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in garlic producing areas of Jinxiang. Chinese Journal of Soil Science, 2021. Vol. 52(2). pp. 434–442. https://doi.org/10.19336/j.cnki.trtb.2020061601
16. Guo Z. J., Zhou Y. L., Wang Q. L., Wang C. W., Song Y. T., Liu F., Yang Z., Kong M. Characteristics of soil heavy metal pollution and health risk in Xiong'an New District. China Environmental Science, 2021. Vol. 41(1). pp. 431–441. https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0049
17. Liu H. W., Zhang Y., Yang J., Wang H., Li Y., Shi Y., Li D., Holm P. E., Ou Q., Hu W. Quantitative source apportionment, risk assessment and distribution of heavy metals in agricultural soils from southern Shandong Peninsula of China. Science of the Total Environment, 2021. Vol. 767. Art. 144879. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144879
18. Liu P., Hu W., Tian K., Huang B., Zhao Y., Wang X., Zhou Y., Shi B., Kwon B.-O., Choi K., Ryu J., Chen Y., Wang T., Khim J. S. Accumulation and ecological risk of heavy metals in soils along the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea: A comparative study of China and South Korea. Environment International, 2020. Vol. 137. Art. 105519. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105519
19. Dong B., Zhang R., Gan Y., Cai L., Freidenreich A., Wang K., Guo T., Wang H. Multiple methods for the identification of heavy metal sources in cropland soils from a resource-based region. Science of the Total Environment, 2019. Vol. 651. pp. 3127–3138. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.130
20. Chai Y., Guo J., Chai S., Cai J., Xue L., Zhang Q. Source identification of eight heavy metals in grassland soils by multivariate analysis from the Baicheng-Songyuan area, Jilin Province, Northeast China. Chemosphere, 2015. Vol. 134. pp. 67–75. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.008
21. Gong C., Quan L., Chen W., Tian G., Zhang W., Xiao F., Zhang Z. Ecological risk and spatial distribution, sources of heavy metals in typical purple soils, southwest China. Scientific Reports, 2024. Vol. 14. Art. 11342. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59718-9
22. Gong C., Wang S., Wang D., Lu H., Dong H., Liu J., Yan B., Wang L. Ecological and human health risk assessment of heavy metal(loid)s in agricultural soil in hotbed chives hometown of Tangchang, Southwest China. Scientific Reports, 2022. Vol. 12. Art. 8563. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11397-0
23. Nanos N., Martín J. A. R. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: Spatial variability in the Duero River Basin (Spain). Geoderma, 2012. Vol. 189–190. pp. 554–562. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.06.006
24. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Самохвалова В. Л., Матісько Б. Ю., Філатов В. М. Еколого-токсикологічна оцінка якості ґрунтів у межах Берестинського району Харківської області. Український журнал природничих наук, 2025. № 14. С. 337–346. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.14.2025.31
25. Філатов В. М., Руденко Д. М., Крайнюков О. М. Деградація ґрунтів у контексті збройного конфлікту: концептуальна модель. Український журнал природничих наук, 2025. № 13. С. 340–348. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.32
26. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Найдьонова О. Є., Філатов В. М., Матісько Б. Ю. Оцінка мілітарного впливу на ґрунти м. Чугуїв Харківської області. Екологічні науки, 2024. № 6(57). С. 194–200. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.14
27. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Найдьонова О. Є. Еколого-токсикологічна оцінка якості ґрунтів території Харківського району Харківської області. Український журнал природничих наук, 2024. № 7. С. 25–32. https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024
28. Kim R.-Y., Yoon J.-K., Kim T.-S., Yang J. E., Owens G., Kim K.-R. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation–a critical review. Environmental Geochemistry and Health, 2015. Vol. 37(6). pp. 1041–1061. https://doi.org/10.1007/s10653-015-9695-y
29. Semenzin E., Critto A., Rutgers M., Marcomini A. Integration of bioavailability, ecology and ecotoxicology by three lines of evidence into ecological risk indexes for contaminated soil assessment. Science of the Total Environment, 2008. Vol. 389(1). pp. 71–86. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.08.032
30. Deville-Cavellin M. S., Guillevic F., Gonindard-Melodelima C., Campillo-Cressot S., Laporte F., Arnoldi C., Rossi M., Foulquier A., Raveton M. Using integrated biomarkers to assess ecological risk from multi-metal and metalloid soil contamination. Chemosphere, 2025. Vol. 393. Art. 144770. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144770
31. Bhat M. A., Kirmani N. A., Agrawal H. P., Bhat M. I., Wani M. A. Heavy Metal Phytotoxicity to Radish (Raphanus sativus L.) in a Digested Sludge-amended Gangetic Alluvium. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2011. Vol. 20(6). pp. 733–743. https://doi.org/10.1080/15320383.2011.594113

Дата першого надходження статті до видання: 13.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026