

УДК 502.173:574.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.135.1.29>

## ВИБІР ПОКАЗНИКІВ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО НОРМУВАННЯ НАЗЕМНИХ ЕКОСИСТЕМ

**Войціцький В.М.** – д.б.н., професор,

провідний науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Корнієнко В.І.** – д.б.н., професор,

директор Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Хижняк С.В.** – д.б.н., професор,

провідний науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Мідик С.В.** – к.вет.н., старший дослідник,

завідувач науково-дослідного відділу моніторингу безпеки продукції

агропромислового комплексу Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

**Березовський О.В.** – к.с.-г.н.,

старший науковий співробітник науково-дослідного відділу моніторингу безпеки продукції агропромислового комплексу Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Надана загальна характеристика забрудників компонентів екосистем (атмосферного повітря, ґрунту, води, біоти), визначено їх основні природні та антропогенні джерела. Стосовно агроекосистем, які є постачальником сировини та харчових продуктів для людей і кормів для сільськогосподарських тварин, акцентується увага на позакореновому (з атмосфери) і кореновому (з ґрунту після потрапляння з атмосфери) шляхів надходження забрудників (токсичних речовин) у рослини.

Відмічається, що контроль екологічної безпеки вимагає використання різних методів аналізу, правильного відбору зразків для аналізу, підготовки і постановки досліджень, що допомагає отримувати реальну інформацію про стан екосистем. Вказується, що для оцінки ступеня забруднення екосистем (зокрема агроекосистем) застосовується моніторинг за використанням низки фізико-хімічних аналітичних методів. Визначені основні етапи проведення екологічного моніторингу екосистем. Серед різноманітних показників моніторингу вказано на необхідність добору на початковому етапі тих, які здатні адекватно відображати стан біоти екосистем та особливості розподілу токсичних речовин в них.

Для оцінки впливу забрудників (токсичних речовин) на стан наземних екосистем (агроекосистем), поточного та довгострокового прогнозування, розробки та застосування способів зменшення їх негативного впливу на екосистеми запропоновано визначати такі показники: коефіцієнти переходу атмосфера – рослини (для позакоренового надходження речовин у рослини), ґрунт – рослина (для їх коренового надходження), коефіцієнти накопичення та затримання з урахуванням коефіцієнтів виносу речовин з екосистем за рахунок дефляції, поверхневого стоку, дифузії в некореновий шар ґрунту. Даний підхід сприяє удосконаленню екологічного нормування безпечності екосистем.

**Ключові слова:** екологічне нормування, забрудники, токсичні речовини, моніторинг, екосистеми.

***Voitsitskiy V.M., Korniyenko V.I., Khyzhnyak S.V., Midyk S.V., Berezovskyi O.V. Selection of indicators for environmental regulation of terrestrial ecosystems***

*A general description of pollutants of ecosystem components (atmospheric air, soil, water, biota) is provided, their main natural and anthropogenic sources are determined. With regard to agroecosystems, which are suppliers of raw materials and food for people and fodder for farm animals, attention is focused on foliar (from the atmosphere) and root (after entering from atmospheric air) ways of pollutants (toxic substances) entering plants.*

*It is noted that environmental safety control requires the use of various methods of analysis, the correct selection of samples for analysis, preparation and staging of studies, which helps to obtain real information about the state of ecosystems. It is indicated that to assess the degree of pollution of ecosystems (including agroecosystems), monitoring using a number of physico-chemical analytical methods is used. The main stages of ecological monitoring of ecosystems are defined. Among the various monitoring indicators, it is indicated the need to select at the initial stage those that are able to adequately reflect the state of biota of ecosystems and the peculiarities of the distribution of toxic substances in them.*

*In order to assess the impact of pollutants (toxic substances) on the state of terrestrial ecosystems (agroecosystems), current and long-term forecasting, development and application of ways to reduce their negative impact on ecosystems, it is proposed to determine the following indicators: atmosphere-plant transition coefficients (for extra-root supply of substances to plants), soil-plant (for their supply to roots), accumulation and retention coefficients taking into account the coefficients of removal of substances from ecosystems due to deflation, surface runoff, diffusion into the non-root layer of the soil. This approach contributes to the improvement of ecological regulation of the safety of ecosystems.*

**Key words:** *environmental regulation, pollutants, toxic substances, monitoring, ecosystems.*

**Постановка проблеми.** Довкілля (тотожне поняття «навколишнє середовище») – сукупність усіх біотичних і абіотичних чинників, що діють на організми, спричинюючи їхнє існування, є складовою частиною екосистем [1]. Воно включає природне середовище і штучне (техногенне) середовище. В широкому розумінні характеризується не лише природними показниками, а також соціально-економічними, етнічними, демографічними та іншими умовами існування та розвитку суспільства.

Глобальною екологічною проблемою є порушення структури і функціонування екосистем внаслідок їхнього забруднення токсичними речовинами. Забруднення – це все те, що виводить екосистеми з рівноваги внаслідок привнесення в довкілля нових нехарактерних хімічних, фізичних і біологічних чинників або перевищення природного рівня концентрації цих чинників у довкіллі [2]. Переважна більшість забрудників піддається у навколишньому середовищі модифікаціям і трансформаціям.

Залежно від забруднення компонентів екосистеми, забруднення поділяють на: атмосферне; ґрунтове; водне (поверхневих і підземних вод, морів, океанів); біотичне (продукти життєдіяльності живих організмів, частини організмів та власне самі мертві організми тощо) [2].

За природою походження забруднення поділяють на: 1) біологічне (генетичне, біотичне); 2) хімічне (хімічні речовини); 3) фізичне (механічне, теплове, світлове, акустичне, електромагнітне, радіоактивне); 4) змішане (фізико-хімічне); 5) геологічне (провокування підтоплень внаслідок діяльності людини, осушення, створення просідань земної поверхні та обвалів ґрунту тощо); 6) візуальне (псування природних пейзажів спорудами, сміттєзвалищами та ін.).

Надзвичайно небезпечним для довкілля є хімічне забруднення компонентів екосистем токсичними речовинами, які здатні потрапляти до організму тварин, зокрема людей, з вдихуваним повітрям через легені; з продуктами харчування, питною водою через шлунково-кишковий тракт; контактним шляхом через шкіру, слизові оболонки носа, рота, очей.

Джерела хімічних забрудників поділяються на природні (без втручання людини) і антропогенні (спричинені діяльністю людини). Основні природні джерела токсичних речовин: вулканічні викиди; землетруси, вивітрювання і вимивання гірських порід; дегазація земної кори та її тектонічні рухи (різні за напрямками та інтенсивністю), які викликають деформацію або розриви її шарів; природні пожежі; селеві потоки; повені; урагани тощо.

Антропогенні джерела токсичних речовин поділяються на промислові (металургійні, хімічні, електротехнічні підприємства, видобування корисних копалин та інші); сільськогосподарські (отрутохімікати, надлишок певних добрив, викиди відходів тваринництва тощо); спалювання викопного палива (вугілля, нафти, газу, торфу, сланцю, деревини) для отримання енергії; викиди і скиди транспортного комплексу; видобуток, переробка, збагачення та використання радіоактивних матеріалів. Суттєвими є також звалища промислового і побутового сміття тощо. Необхідно зазначити, що як перелік, так і кількість токсичних хімічних речовин антропогенного походження в останні десятиріччя, незважаючи на низку нормативних законодавчих актів, значно перевищив рівень, який знаходився у біосфері за уся попередню історію існування.

Повномасштабні військові дії на території України, починаючи з 24.02.2022 року уже спричинили екоцид [3] – навмисний згубний вплив на довкілля та його мешканців, який спричинений використанням високотоксичних речовин та їхньою дією, забрудненнями і навіть руйнуванням екосистем тощо. Насамперед, це забрудники, які утворюються при детонації вибухових речовин, залишки токсичного палива збитих ракет, літаків, гелікоптерів, розливи палива військової техніки та спеціальних військових технічних рідин (етиленгліколю, дихлоретану, трихлоретилену та ін.), руйнування екологічно небезпечних підприємств, комунальних комунікацій, дамб (як це відбулося 06.06.2023 р. з Каховською ГЕС) тощо. Усі наслідки військових дій не можливо усвідомити до їхнього закінчення та визначення, зокрема, стосовно спричиненої шкоди завданої екології.

Для оцінки ступеня забруднення екосистем використовується метод моніторингу – спосіб пізнання, який базується на цілеспрямованому і планомірному сприйнятті явищ і процесів, що відбуваються в екосистемах [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На екосистеми, які є фундаментальними матрицями для життєздатності і життєдіяльності біоти, діють чинники природного та антропогенного походження [2, 5, 6]. Найголовнішим підходом щодо визначення ступеня впливу таких чинників на компоненти екосистем (повітря, ґрунт, воду, біоту) є моніторинг [2, 5-8]. На основі отриманих результатів розробляються та застосовуються методи щодо попередження або, хоча б, зменшення негативного впливу на екосистеми токсичних чинників. Це потребує використання необхідних показників і параметрів, які адекватно характеризують екологічний стан екосистем.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Важливим для оцінки безпечності екосистем за їхнього можливого забруднення токсичними речовинами на початковому етапі досліджень є вибір необхідних показників. Запропоновано використовувати коефіцієнти накопичення токсичних речовин у біоті, зокрема в рослинах, а також коефіцієнти затримання та виносу.

**Постановка завдання.** Метою роботи є визначення показників для моніторингу при дослідженні екологічного стану наземних екосистем (агроекосистем) за умов їхнього забруднення токсичними речовинами.

Методика проведення досліджень. В основі досліджень покладено аналіз та систематизацію науково-обґрунтованих відомостей стосовно токсичних забрудників (речовин) довкілля, їхньої міграції в наземних екосистемах, моніторингу стану таких систем.

**Виклад основного матеріалу.** Токсичні речовини довкілля в навколишньому середовищі здатні потрапити в рослини наземних екосистем залежно від способу контакту з рослинами: з наземної частини рослин чи з поверхневого шару ґрунту. Ті з них, які абсорбувалися на наземних частинах рослин надходять позакореневим шляхом. Найактивніше це відбувається за листового і квіткового (флорального) поглинання. Причому за останнього можливе механічне захоплення відносно великих стійких частинок квітками з можливим їхнім включенням до плоду чи насіння. Також ймовірно поглинання стеблами та поверхневими коренями рослин.

До позакореневого поглинання здатні тільки ті токсичні речовини, які відносно міцно адсорбуються наземними органами рослин (стійкі до вітру та дощу). Обов'язковою умовою проникнення речовини у рослини цим способом є наявність вологи.

Частина поглинутих речовин рослинами може залишитися у місці їх проникнення, інша – включається у транспортні системи, потрапляє у всі органи рослини і там нагромаджується або трансформується. Цей процес залежить, насамперед, від фізико-хімічних властивостей речовин, специфіки виду рослин, їхнього фізіологічного стану тощо.

Речовини, які потрапили на поверхню ґрунту, під впливом вітру внаслідок процесу дефляції можуть кумулюватися на наземних частинах рослин. Також під впливом опадів, міграційних процесів або агротехнічних заходів в агроекосистемах потрапляти в глибші шари ґрунту.

ґрунт, а особливо його поверхневий шар, є сильним поглиначем різних речовин, у тому числі токсичних. У залежності від властивостей речовин, специфіки рослин, розвитку їхньої кореневої системи, фізіологічного стану рослин, фізико-хімічних властивостей ґрунту, його вологості, наявності в ньому речовин і організмів, які здатні впливати на сорбційну здатність коренів токсичні речовини здатні потрапляти в рослини (кореневий шлях потрапляння).

Дослідження закономірностей поведінки токсичних речовин (екотоксикантів) у системах атмосфера – рослина і ґрунт – рослина, зв'язку між їхнім вмістом в атмосфері чи ґрунті та в рослинах, можливих шляхів транспортування рослинами, все це має надзвичайно велике значення для прогнозування накопичення токсичних речовин рослинами (у тому числі сільськогосподарськими культурами), розробки адекватних заходів зі зменшення або запобігання їхнього надходження до рослин. Саме цьому попередньо здійснюють моніторинг екосистем.

Моніторинг довкілля – це комплекс наукових, технічних і технологічних засобів, які забезпечують контроль (стеження) за станом та тенденціями розвитку природних і антропогенних процесів [1, 2, 4, 5-8]. Екологічний моніторинг довкілля (атмосфери, ґрунту, води, біоти) проводять, насамперед, з метою визначення реального стану об'єктів довкілля, розробки заходів щодо їхньої охорони, раціонального використання природних ресурсів та попередження критичних ситуацій, що можуть зашкодити біоті та природі вцілому.

Система екологічного моніторингу здійснює: збір і аналіз інформації про причини і вірогідні зміни стану довкілля; визначення змін в екологічних системах; визначення в динаміці запасів корисних копалин, ґрунтових, водних, біотичних ресурсів, резервів, біосфери вцілому.

Екологічний моніторинг поділяється:

1) за масштабами проведення та оцінкою інформації на глобальний (спостереження за загальносвітовими явищами і процесами в біосфері Землі), регіональний (спостереження в межах певних регіонів, тобто територіальних одиниць) і локальний (спостереження лише на певній місцевості, а саме території, яка не виходить за межі цієї місцевості);

2) за специфікою методів отримання та оцінки інформації – на біологічний, геохімічний, геофізичний;

3) за специфікою об'єктів захисту – на моніторинг атмосфери, ґрунту, поверхневих вод (гідрологічний), підземних вод (гідробіологічний), рослинних ресурсів (геоботанічний), тваринного світу (зоологічний), промислових навантажень та ін.

Крім суцільно екологічного моніторингу у природознавстві існують інші (біологічний, кліматичний, геофізичний) моніторинги ступеня антропогенного порушення компонентів довкілля (атмосфера ґрунту, води, біоти) та ін. Етапи моніторингу включають як загально необхідні (рис. 1), так і ті, що відображають специфіку конкретних екосистем.

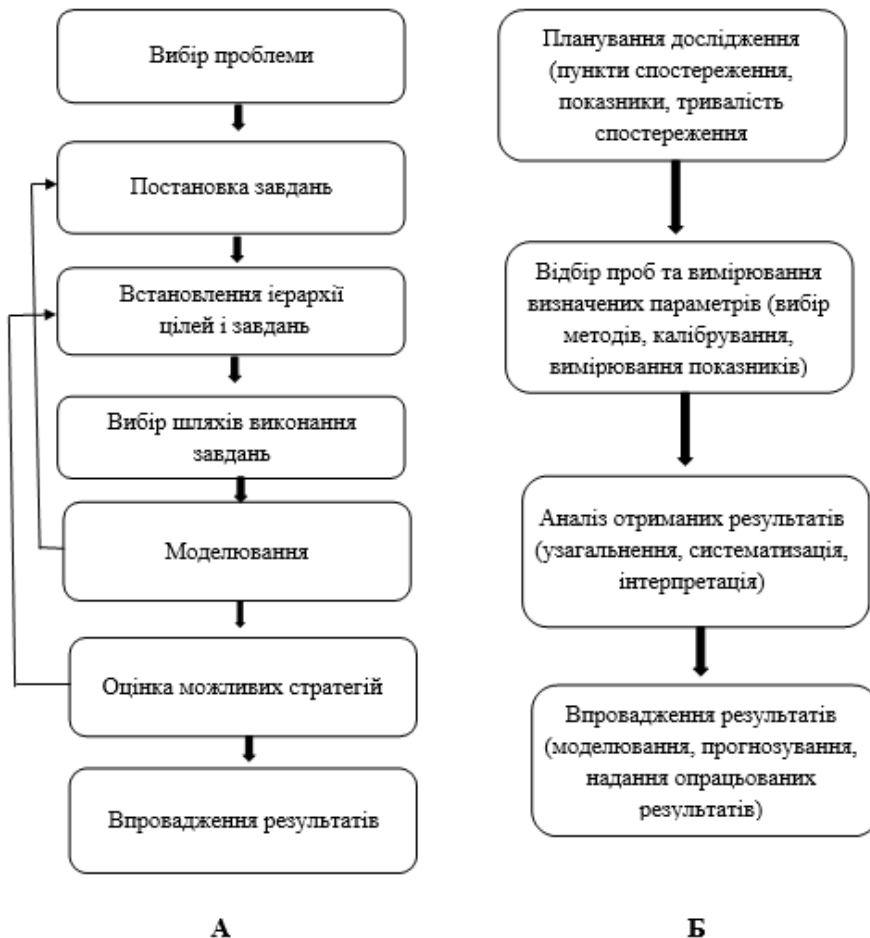


Рис. 1. Етапи проведення екологічного моніторингу: А – за [9], Б – за [10]

При оцінці стану довкілля провідна роль належить фізичним і хімічним аналітичним методам (спектроскопічні, хроматографічні, електрофоретичні, електрохімічні, імунологічні) визначення концентрації токсичних речовин (їх трансформованих продуктів) в компонентах довкілля (атмосфері ґрунті, воді, біоті). Суть цих методів – визначення концентрації досліджуваної речовини в компонентах довкілля (екосистем) та їх порівняння з максимально допустимими концентраціями, зазначеними в нормативних документах.

Існуючі нормативи не забезпечують повного контролю екологічної безпеки довкілля. Вони, зазвичай, враховують ефекти сумісної дії одночасно декількох негативних чинників. Також важко (неможливо) отримати інформацію про вторинні ефекти дії токсичних речовин. Також із удосконаленням методів діагностики негативної дії токсичних речовин постійно переглядаються нормативи. При виявленні забруднених зон застосування аналітичних методів є пріоритетним. У той же час, виявлення наслідків дії токсичних речовин на довкілля неможливе без застосування прийомів біоіндикації, тобто виявлення біологічно значущих навантажень на основі реакцій найбільш чутливих організмів та їхніх співтовариств [2, 8].

Надзвичайно важливі показники і параметри, які дозволяють спрогнозувати (оцінити) стан біоти екосистем та особливості розподілу токсичних речовин в цих системах.

До таких показників відносяться, зокрема, ступінь накопичення рослинами речовин (у тому числі токсичних) внаслідок позакореневого і кореневого шляхів, що особливо актуально для агроекосистем. Цей процес описується наступною формулою:

$$C = aP_{\text{атм}} + bP_{\text{ґрунт}},$$

де  $C$  – концентрація речовини в рослині (мг в 1 кг повітряно-сухої біомаси рослин);

$a$  – коефіцієнт переходу речовини «атмосфера-рослина»;

$P_{\text{атм}}$  – кількість речовини, що випала з атмосфери на рослинний покрив протягом вегетації або за конкретний термін, мг;

$b$  – коефіцієнт переходу речовини «ґрунт-рослина»;

$P_{\text{ґрунт}}$  – кількість речовини, яка акумулюється у ґрунті, мг.

Для характеристики накопичення речовин в екосистемах застосовується коефіцієнт накопичення ( $K_n$ ), який демонструє у скільки разів більшим чи меншим може бути вміст речовини в елементі системи, наприклад, в рослинах, порівняно з компонентами екосистеми (повітрям, ґрунтом, водою):

$$K_n = C_1 / C_2,$$

де  $C_1$  – вміст речовини в елементі екосистеми (рослинах), мг в 1 кг повітряно-сухої біомаси рослини;

$C_2$  – вміст речовини в об'єкті довкілля (мг в 1 дм<sup>3</sup> повітря, або в 1 кг повітряно-сухої маси ґрунту, або в 1 дм<sup>3</sup> води).

Інший коефіцієнт – коефіцієнт переходу ( $K_n$ ) – це відношення вмісту речовини ( $C_1$ , мг в 1 кг повітряно-сухої біомаси рослин) до її вмісту ( $C_2$ , мг в 1 м<sup>3</sup> повітря або в 1 кг повітряно-сухої маси ґрунту):

$$K_n = C_1 / C_2$$

Здатність затримувати речовини, які потрапили, зокрема в кореневу зону рослин, визначається коефіцієнтом затримання ( $K_z$ ):

$$K_3 = A/B,$$

де  $A$  – кількість речовини, яка була накопичена рослиною (мг в 1 кг повітряно-сухої біомаси рослин);

$B$  – кількість речовини, що акумулюється у ґрунті (мг в кг повітряно-сухої маси ґрунту в поверхневому шарі та шарі кореневої зони).

Частина речовини, яка потрапила в екосистему, здатна не тільки затримуватися в ній, але і виноситися з неї. Коефіцієнт вносу такої речовини ( $K_6$ ) залежить від низки чинників. Основні з них: перенесення вітром (дефляція), стік з поверхні, дифузія в некореневий шар ґрунту, а для агроєкосистем також винос із врожаєм (насінням, плодами, біомасою):

$$K_6 = K_o C_o B_o / a v c A_o,$$

де  $K_o$  – коефіцієнт переходу речовини з ґрунту в рослини;

$C_o$  – концентрація речовини у ґрунті (мг на 1 кг повітряно-сухої маси ґрунту);

$B_o$  – урожай біомаси з одиниці площі (кг з 1 км<sup>2</sup> площі ґрунту);

$A_o$  – кількість речовини, що первинно потрапила на ґрунт (мг на 1 км<sup>2</sup>);

$a$  – коефіцієнт для врахування ймовірності вітрового перенесення речовини;

$v$  – коефіцієнт для врахування ймовірності стану речовини поверхневими водами;

$c$  – коефіцієнт для врахування ймовірності дифузії речовини в некореневий шар ґрунту.

Існує також ряд інших показників і параметрів, які можуть застосовуватися для контролю екологічної безпеки, зокрема, гранично допустиме надходження (викид) токсичних речовин, а також санітарно-гігієнічні показники. До останніх відносяться гранично допустимі концентрації (ГДК) токсичних речовин у середовищі (компонентах довкілля). Ці концентрації безпечні при потраплянні до організму людини, тобто не мають викликати відхилень в стані здоров'я або захворювань, які виявляються сучасними методами діагностики в будь який термін життя, а також у нащадків. Крім того, це максимальна кількість шкідливої речовини в одиницях маси або об'єму у ґрунтового, водному чи повітряному середовищах, що не впливає на здоров'я людини та її нащадків [4].

Проте принципово важливим моментом при розгляді впливу забруднюючих речовин на наземні екосистеми чи їх компоненти, зокрема, на рослини є факт, що ГДК (багатьох забруднюючих речовин) для рослин відрізняються від таких для людини. Рослини значно вразливі, що буде мати хоч і більш віддалені, проте значні наслідки і для людини [11]. Таким чином, при проведенні екологічного контролю екосистем, необхідне використання показників, які сприяють отриманню реальної інформації про стан довкілля.

#### **Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження.**

Для оцінки стану наземних екосистем при потраплянні до них токсичних речовин – забрудників, поточного та довгострокового прогнозування, розробки та застосування способів зменшення їх негативного впливу на рослинну компоненту цих екосистем доцільно на початковому етапі для аналітичних досліджень визначити такі показники як коефіцієнти переходу атмосфера – рослини (для позакореневого надходження речовин у рослини), ґрунт – рослина (для кореневого надходження), коефіцієнти накопичення, затримання та вносу. Даний підхід сприяє удосконаленню екологічного нормування безпечності екосистем.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Мусієнко М.М., Серебряков В.В., Брайон О.В. Екологія: Охорона природи: словник-довідник. К.: Знання, 2002. 550 с.
2. Жирнов В.В., Савченко Д.А. Біоконверсія відходів. Частина 1: підручник. К.: ДДП Експо-Друк, 2017. 302 с.
3. Герасимчук Л.О. Військові дії як чинник утворення відходів *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 133. С. 305-312. DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2023.133.41>
4. Данчук В.В., Ушкалов В.О., Войціцький В.М. та ін. Агротоксикологія: словник-довідник найбільш вживаних агроекологічних термінів / за ред. В. О. Ушкалова. К.: ФОП Ямчинський О.В., 2021. 494 с.
5. Мороз О.І. Екологічна безпека. Львів: вид-во Львівська політехніка, 2021. 292 с.
6. Юрченко Л.І. Екологія. К.: ЦНЛ Професіонал, 2019. 304 с.
7. Рудько Г.І., Адаменко О.М. Екологічний моніторинг геологічного середовища. Львів: ВЦ Львівський національний університет ім. І. Франка, 2021. 246 с.
8. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Мідик С.В. Моніторинг екосистем: цілі, необхідність, роль біоіндикації. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т.11. № 3-4. С. 39-46.
9. Кунах О.М., Жуков О.В., Пахомов О.Є. Оцінка стану екосистем та їх компонент: навчально-методичний посібник. Дніпро: «Арбуз», 2020. 77 с.
10. Khyzhnyak S., Voitsitskiy V., Dovbysh O., Liaska Y., Korniyenko V. Recovery and reservation in the formation of ecosystem reliability. *EUREKA: Life Sciences*. 2023. № 3. p. 12–19. <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2023.002993>
11. Тарасова В.В., Данкевич Є.М., Ковалевська І.М., Данкевич В.Є. Екологічне нормування: підручник / Заг. ред. В.В. Тарасової. Житомир: Видавець: О.О. Євенок, 2017. 344 с.