

---

# ЕКОЛОГІЯ, ІХТІОЛОГІЯ ТА АКВАКУЛЬТУРА

---

## ECOLOGY, ICHTHYOLOGY AND AQUACULTURE

УДК 502.172:505.5-047.72

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.115.40>

---

### ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОЦЕСІВ МІГРАЦІЇ ТА НАКОПИЧЕННЯ ПОЛЮТАНТІВ АГРОЕКОСИСТЕМАМИ

---

**Войціцький В.М.** – д.б.н., професор, провідний науковий співробітник,  
Українська лабораторія якості і безпеки АПК

Національного університету біоресурсів і природокористування України

**Хижняк С.В.** – д.б.н., професор, провідний науковий співробітник,  
Українська лабораторія якості і безпеки АПК

Національного університету біоресурсів і природокористування України

**Конопольський О.П.** – завідувач відділу еколого-токсикологічних досліджень,  
Українська лабораторія якості і безпеки АПК

Національного університету біоресурсів і природокористування України

*У статті наведено основні джерела та можливі шляхи надходження політантів до агроєкосистем. Відмічається все більший внесок антропогенного чинника в забруднення агроєкосистем, що може призвести до зниження її продуктивності чи модуляції й навіть деградації. Акцентується увага на використанні методу камерних моделей для прогнозування процесів міграції та накопичення політантів компонентами агроєкосистем, а перехід політантів між камерами зумовлюється коефіцієнтами переходу й описується системою диференціальних рівнянь. Наведено структуровані блок-схеми для опису перенесення політантів до рослин і подальшого потрапляння до продуктів харчування й корму для тварин. Проаналізовано основні шляхи надходження політантів до рослин: позакореневе надходження та через кореневу систему з ґрунту (кореневе надходження). Здатність агроєкосистеми функціонувати в умовах впливу політантів розглянуто із залученням теорії надійності й місткості екосистем, виходячи з надійності окремих її компонентів, що характеризує ліміт забруднення агроєкосистеми політантами, за якого ще не спостерігаються зміни, загрозили її існуванню та функціонуванню. Для збільшення надійності агроєкосистем постулюється необхідність зменшення накопичувальних процесів для політантів як окремими компонентами, так і всією агроєкосистемою з метою забезпечення мінімально можливого потрапляння політантів до продуктів харчування й кормів для свійських тварин. Розроблений і представлений підхід дає змогу проводити оцінювання міграційних процесів політантів транспортними ланцюгами агроєкосистем і можливо їх накопичення харчовими продуктами й кормами, що сприяє добору контрзаходів щодо зменшення накопичення політантів компонентами агроєкосистем.*

**Ключові слова:** агроєкосистеми, політанти, міграція, накопичення, метод камерних моделей.

---

**Voitsitskiy V.M., Khyzhnyak S.V., Konopol'skiy O.P. Forecasting migration processes and accumulation of pollutants by agroecosystems**

The article presents the main sources and possible ways of entry of pollutants into agroecosystems. There is an increasing contribution of anthropogenic factors to the pollution of agroecosystems, which can lead to a decrease in its productivity or modulation and even to degradation. Emphasis is placed on the use of the method of chamber models to predict the processes of migration and accumulation of pollutants by components of agroecosystems, and the transition of pollutants between chambers is determined by transition coefficient and described by a system of differential equations. Structured flowcharts are presented to describe the transfer of pollutants to plants and subsequent entry into food and animal feed. The main pathways of pollutants' entry to plants are analyzed: by foliar intake and through the root system from the soil (root uptake). The ability of the agroecosystem to function under the influence of pollutants is considered using the theory of reliability and capacity of ecosystems, based on the reliability of its individual components, which characterizes the limit of pollution of the agroecosystem at which there are no changes that threaten its existence and functioning. To increase the reliability of agroecosystems, it is necessary to reduce the accumulation processes for pollutants, both by individual components and the whole agroecosystem, in order to ensure the minimal possible entry of pollutants into food and feed for domestic animals. The approach developed and presented in the article allows us to assess the migration processes of pollutants by transport chains of agroecosystems and their possible accumulation in food and feed, which contributes to the selection of countermeasures to reduce the accumulation of pollutants by components of agroecosystems.

**Key words:** agroecosystems, pollutants, migration, accumulation, chamber model method.

**Постановка проблеми.** Наша планета Земля вже вступила в епоху Антропоцен (грецьк. *anthropos* – людина та *kentron* – центр), оскільки людська діяльність нині є найважливішим чинником глобальних змін, які можуть мати суттєві й необоротні негативні наслідки для людства та загалом біоти Землі [1]. Одна з причин, яка призвела до загрозливого стану довкілля, – це антропогенні навантаження. Вони мають постійний характер і часто перевищують допустимі рівні, що негативно впливає на колообіг речовин і їх асиміляцію, потік енергії, наслідком чого може бути руйнування, зниження продуктивності чи модуляція екосистеми.

Серед екосистем особлива увага надається агроекосистемам – системі популяції культивованих рослин на оброблених ґрунтах [2]. З'ясування шляхів міграції й накопичення поллютантів (англ. *pollutant* – забрудник) агроекосистемами дає можливість науково обґрунтувати підходи до зниження рівня накопичення цих речовин у продуктах харчування та кормах.

Сьогодні недостатньо розроблені методичні підходи до оцінювання станів локальних агроекосистем і принципи їх контролю й коригування змін за зовнішнього впливу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Міграція та накопичення поллютантів ланцюгами екосистем, зокрема й агроекосистем, – доволі складний процес, який залежить від багатьох чинників [3], таких як фізико-хімічні властивості самих поллютантів, дія абіотичних (температура, вологість тощо) і біотичних (організмів, які здатні накопичувати чи трансформувати поллютанти) чинників, шляхи потрапляння поллютантів до екосистеми та надходження до організмів і включення в метаболізм біоти, а також багато інших.

Для прогнозування поведінки поллютантів в екосистемах запропоновані математичні моделі (LEACHP, PESTLA, MACRO, PLEMO тощо), однак кожна з них має свої складності й обмеженість застосування. Водночас відносно простою та зручною моделлю оцінювання процесів накопичення поллютантів компонентами екосистем і їх перенесення ланцюгами екосистем може бути метод камерних моделей [4], який запропонований для оцінювання міграції радіоізотопів [5], пестицидів [6] і важких металів [7] наземними та водними екосистемами.

**Постановка завдання.** Пропонується застосування методу камерних моделей для оцінювання міграційних процесів і накопичення поллютантів локальною (наземною) агроєкосистемою, яка складається з біогенних компонентів (зокрема штучно створеного людиною агрофітоценозу) на певному відрізку агроландшафту та взаємодіє з навколишнім середовищем.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** За джерелами виникнення поллютантний профіль довкілля складається з природних (викликаних природними причинами) й антропогенних (пов'язаних із діяльністю людей) забруднень. Причини природних забруднень – це виверження вулканів, землетруси, повені, смерчі, урагани тощо. Антропогенні забруднення підрозділяються на промислові (техногенні); сільськогосподарські (використання добрив, отрутохімікатів, зокрема, пестицидів), скиди відходів тваринницьких ферм, птахофабрик, відгодівельних комплексів тощо; дорожньо-транспортні; наслідки військових дій, випробувань військової зброї, знищення боєприпасів і вибухових речовин; різноманітне сміття; фізико-хімічне забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсними рідкими і твердими речовинами (промисловий смог) тощо [8].

Серед біологічних забрудників на особливу увагу заслуговує організменне забруднення (унесення чужорідних (заносних) і шкідливих для екосистеми живих організмів і продуктів їх життєдіяльності, патогенних і паразитичних мікроорганізмів і вірусів), а також забруднення біогенними речовинами (продукти життєдіяльності організмів, відмерлі організми, харчові відходи тощо) [1].

Варто враховувати, що агроєкосистеми можуть бути забруднені поллютантами, які потрапляють як із природних, так й антропогенних джерел. На цей процес, зокрема, впливають фізико-хімічна форма поллютантів (аерозолі, пара, частинки, які сорбовані на різних матеріалах тощо), їх стійкість у довкіллі (що залежить від реакції середовища, гранулометричного складу ґрунту, умісту в ньому гумусу тощо) чи погодно-кліматичні умови (вітер, температура, атмосферні опади тощо). Крім того, надходження поллютантів до рослин агроєкосистеми залежить від видових і сортових особливостей рослин, унесення пестицидів чи агрохімікатів тощо.

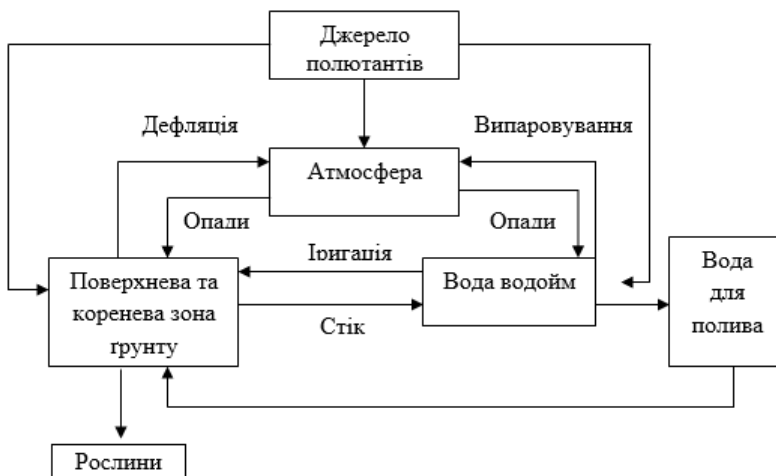


Рис. 1. Основні шляхи потрапляння поллютантів до наземної компоненти агроєкосистеми

Основні шляхи потрапляння поллютантів до наземної компоненти агроєкосистеми можна подати так (рис. 1).

Дослідження накопичення й міграції поллютантів агроєкосистемою надзвичайно важливе для розуміння можливої небезпеки для біоти, у тому числі людини. Основне призначення наземних агроєкосистем – це вирощування рослинної харчової продукції для людей і кормів для свійських тварин. Надходження поллютантів до організму людини може відбуватися внаслідок безпосереднього вживання в їжу рослинної сільськогосподарської продукції чи сільськогосподарських тварин, які споживають цю продукцію.

Згідно з методом камерних моделей, для опису перенесення речовин (поллютантів) агроєкосистемою її поділяють на камери, кожна з яких – це компонент цієї системи або її функціональна одиниця. Перехід речовин між камерами зумовлюється коефіцієнтами переходу й описується системою диференціальних рівнянь на основі законів кінетики першого порядку [4].

Коефіцієнт переходу речовин із кореневої та поверхневої зони ґрунту до рослин за поширеними методиками визначається у 20-сантиметровому вертикальному шарі ґрунту. Коефіцієнти переходу ( $K_n$ ) речовин (поллютантів) визначають так [4]:

$$K_n = \frac{C_1}{C_2},$$

де  $C_1$  – уміст поллютанту (мг або мкг) в 1 кг повітряно-сухої біомаси рослин;  $C_2$  – уміст цього поллютанту (мг або мкг) в 1 кг повітряно-сухої маси ґрунту.

Поллютанти надходять до рослин двома основними шляхами: позакореневе надходження й через кореневу систему з ґрунту (кореневе надходження) [4]. Позакореневе надходження поллютантів відбувається з атмосфери внаслідок опадів чи вторинного вітрового підйому з поверхні ґрунту (дефляції), а також із водними стоками, у тому числі при поливі водою, яка містить поллютанти. Позакореневе надходження поллютантів до рослин може відбуватися протягом усього періоду вегетації. У свою чергу, після осадження поллютантів на рослини частина з них, яка немідно адсорбується на наземних органах рослин, може змиватися опадами і здуватися вітром.

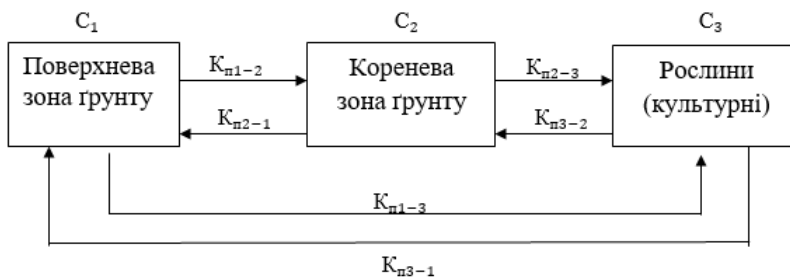


Рис. 2. Найпростіша динамічна трикамерна модель перенесення поллютантів ланцюгом агроєкосистеми: поверхнева зона ґрунту → коренева зона ґрунту → культурні рослини

Примітки: 1, 2, 3 – номер модельної камери;  $C_1$ ,  $C_2$  і  $C_3$  – концентрація поллютанта у відповідних камерах;  $K_{n\ 2-1}$ ,  $K_{n\ 2-3}$  і  $K_{n\ 1-3}$  – прямі коефіцієнти переходу поллютантів між відповідними камерами.

Коренева надходження полютантів до рослин зумовлене властивостями поверхневого горизонту ґрунту поглинати різні речовини, а залучення цих речовин до біологічного колообігу зумовлюється як міцністю їх зв'язку з частинками ґрунту, так і здатністю поглинатися коренями рослин. Необхідно враховувати, що сорбція полютантів із ґрунту коренями рослин може збільшуватися, зокрема, зі зростанням опадів.

Отже, з використанням, наприклад, динамічної трикамерної моделі можна описати перенесення полютантів компонентами агроєкосистеми: поверхнева зона ґрунту → коренева зона ґрунту → культурні рослини (рис. 2). У цій моделі камера відповідає певній ланці екосистеми.

Представлена модель перенесення полютантів (рис. 1) може бути описана системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\frac{d C_1}{dt} &= K_{\Pi 2-1} \cdot C_2 - K_{\Pi 1-2} \cdot C_1 + K_{\Pi 3-1} \cdot C_3; \\ \frac{d C_2}{dt} &= K_{\Pi 2-1} \cdot C_1 - K_{\Pi 2-3} \cdot C_2 + K_{\Pi 3-2} \cdot C_3; \\ \frac{d C_3}{dt} &= K_{\Pi 2-3} \cdot C_3 - K_{\Pi 3-1} \cdot C_3 + K_{\Pi 3-1} \cdot C_3 + K_{\Pi 1-3} \cdot C_1.\end{aligned}$$

Така система диференціальних рівнянь може бути розв'язана та вирахована значенням концентрацій полютанту при будь-яких значеннях коефіцієнтів переходу ( $K_n$ ) від моменту надходження полютанту до першої камери.

Згідно з положеннями динамічної камерної моделі, постулюється [4]: 1) при надходженні полютанту до камери він миттєво переміщується в різних частинах камери однаково в будь-який момент часу; 2) коефіцієнти переходу полютантів ( $K_n$ ) між камерами є сталими; 3) перенесення полютантів з однієї камери до іншої відбувається за законами кінетики першого порядку, цей процес описується системою простих диференціальних рівнянь.

Відомо, що однією з основних властивостей екосистем є їх надійність – властивість підтримувати свою структуру та безвідмовно виконувати функції, самовідновлюватися й саморегулюватися за природних та антропогенно-спричинених впливах [9]. Однак агроєкосистемі, яка має високу врожайність одного (декількох) видів або сортів культурних рослин, характерна низька надійність і нездатність до тривалого існування без підтримки людиною. Тому для підвищення можливості її існування та посилення функціональної ефективності необхідним є збільшення надійності.

Основні підходи камерної моделі в умовах агроєкосистеми можна застосувати для оцінювання надійності при забрудненні полютантами [4]. У термінах камерних моделей надійність елемента ( $P_i$ ) екосистеми (у тому числі агроєкосистеми) можна оцінити за використання параметра швидкості обміну полютантів між камерами [2]:

$$P_i = \sum V_{ij} / (\sum V_{ij} + \sum V_{ji}),$$

де  $P_i$  – надійність  $i$ -го елемента екосистеми;  $\sum V_{ij}$  – сума швидкостей переходу полютантів до  $i$ -камери з  $j$ -камер;  $\sum V_{ji}$  – сума швидкостей переходу полютантів із  $i$ -камери до  $j$ -камер.

При оцінюванні накопичувальної та транспортувальної здатності агроєкосистеми щодо полютантів урахується їх місткість стосовно цих речовин – ліміт забруднення агроєкосистеми полютантами, за якого ще не спостерігаються зміни,

загрозливі її існуванню й функціонуванню [3]. Це фундаментальна властивість, яка визначає ту граничну кількість поллютантів, що може стабільно утримувати біота екосистеми без зміни (за рахунок надійності) своїх основних функцій (приросту біомаси, зміни складу тощо). Місткість агроекосистеми може виступати як міра надійності кожного компонента агроекосистеми, а також цієї системи загалом [11].

При збільшенні надійності агроекосистеми необхідно зменшити можливість накопичувальних процесів для поллютантів як окремими компонентами, так і всією агроекосистемою з метою забезпечення мінімально можливого потрапляння поллютантів до продуктів харчування людей і корму свійських тварин.

Головна функція агроекосистеми полягає у створенні первинної біологічної рослинницької продукції, що є основою функціонування всіх її ланок і власне найважливішим її завданням – забезпечити людину продуктами харчування.

Застосовуючи апробований метод камерних моделей [4–8; 10], можна запропонувати структуровану блок-схему потрапляння поллютантів до агроекосистеми, а потім до споживачів сільськогосподарської продукції (рис. 3).

Аналізуючи перенесення поллютантів компонентами агроекосистеми, що є постачальником сільськогосподарської продукції, необхідно підкреслити, що основний потік поллютантів відбувається в ланцюзі, первинною ланкою якої є такі компоненти агроекосистеми:

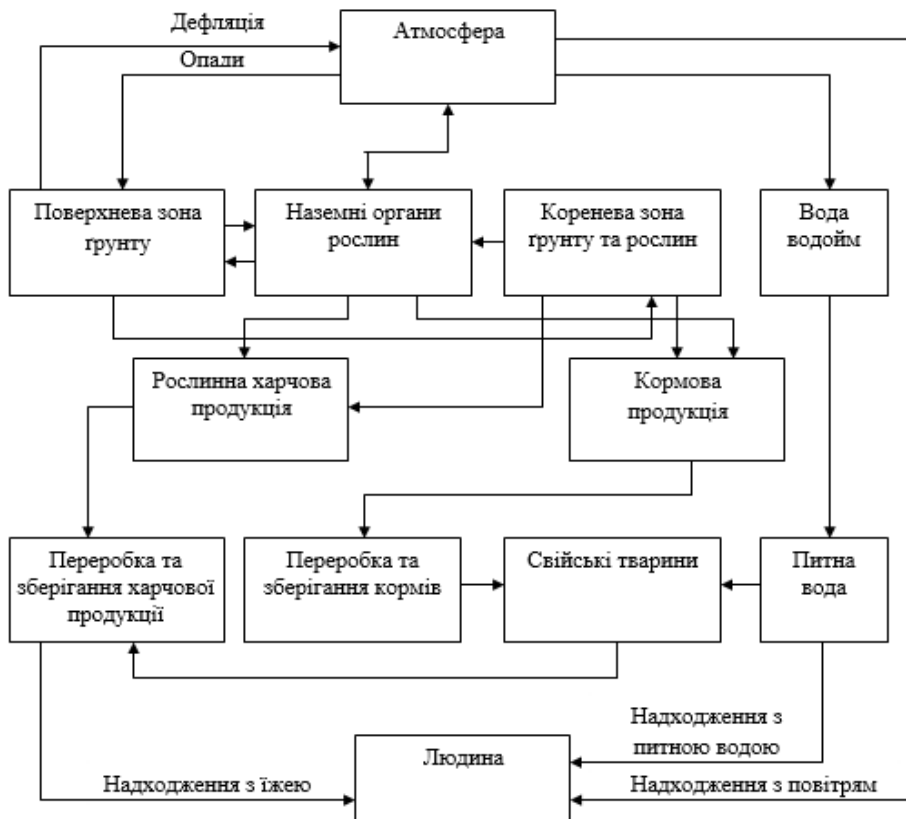


Рис. 3. Основні шляхи надходження поллютантів до агроекосистеми та споживачів рослинної продукції (людей і свійських тварин)

грунт → трава, корма, рослинні продукти харчування → свійські тварини → молоко, м'ясо → люди ←

Отже, для прогнозування міграційних процесів речовин (поллютантів) в агроєкосистемах відносно простим і зручним є метод камерних моделей, у якому компоненти агроєкосистеми поділені на камери, а для кількісної оцінки процесу міграції поллютантів використовується коефіцієнт переходу, який свідчить, у скільки разів більша (чи менша) кількість поллютанту в компонентах агроєкосистеми чи порівняно з довкіллям.

Крім того, для зменшення здатності агроєкосистем до накопичення поллютантів і в подальшому їх потрапляння до продуктів харчування й корму для тварин необхідно використовувати запобіжні заходи, що базуються на вдосконаленні технології виробництва, у тому числі правильному застосуванні агрохімікатів, проводити рекультивацію ґрунтів, вирощувати культури, які толерантні до забруднення або призначені для задоволення технічних потреб. При застосуванні подібних засобів необхідно дуже зважено, науково обґрунтовано підходити до питання добору контрзаходів щодо потрапляння поллютантів до продуктів харчування та кормів.

**Висновки і пропозиції.** Агроєкосистеми є джерелом потрапляння природних та антропогенних поллютантів з довкілля до людей і свійських тварин через продукти харчування й корм. Для дослідження перенесення та накопичення поллютантів компонентами агроєкосистеми, зокрема рослинами, запропоновані структуровані блок-схеми, що базуються на методі камерних моделей. Доцільним є залучення цього методу для оцінювання надійності агроєкосистеми, виходячи з даних щодо надійності окремих її компонентів, а також місткості агроєкосистеми щодо накопичення поллютантів.

Розроблений підхід дає змогу проводити оцінку міграційних процесів поллютантів транспортними ланцюгами агроєкосистем і можливого їх накопичення харчовими продуктами й кормами, що сприяє добору контрзаходів щодо зменшення накопичення поллютантів рослинними компонентами агроєкосистем.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Жирнов В.В., Савченко Д.А. Біоконсервація відходів. Частина I. Київ : ДДП «Експо-Друк», 2017. 302 с.
2. Мусієнко М.М., Серебряков В.В., Брайон О.В. Екологія. Охорона природи : словник-довідник. Київ : Т-во «Знання», КОО, 2002. 550 с.
3. Кутлахмедов Ю.А., Матвеева И.В., Гроза В.А. Надежность биологических систем. Киев : Фитосоцицентр, 2018. 352 с.
4. Застосування моделювання для прогнозування міграції екотоксикантів наземними і водними екосистемами : науково-практичні рекомендації для установ України екологічного профілю / В.М. Войціцький, С.В. Хижняк, С.В. Мідик та ін. Київ : РВВ НУБіП України, 2019. 31 с.
5. Кутлахмедов Ю.О., Войціцький В.М., Хижняк С.В. Радиобіологія : підручник. Київ : ВПЦ «Київський університет» 2011. 543 с.
6. Шляхи міграції стійких пестицидів трофічними ланцюгами наземних і водних екосистем / С.В. Хижняк, В.М. Войціцький, В.В. Данчук та ін. *Біоресурси і природокористування*. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 36–43.
7. Надходження і міграція важких металів наземними і водними екосистемами / В.М. Войціцький, С.В. Хижняк, В.В. Данчук та ін. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11. № 1–2 С. 59–68.
8. Моніторинг екосистеми: цілі та необхідність, роль біоіндикації / В.М. Войціцький, С.В. Хижняк, С.В. Мідик та ін. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11. № 3–4. С. 39–46.

9. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Визначення надійності екосистем до чинника антропогенного тиску. *Екологічна безпека та природокористування*. 2017. № 3–4 (24). С. 50–57.

10. Шляхи міграції екотоксикантів агроекосистемами / В.М. Войцицький, С.В. Хижняк, В.В. Данчук та ін. *Агроєкологічний журнал*. 2019. № 1. С. 36–42.

11. Матвєєва І.В. Проблеми надійності екологічних систем. Київ : Книжкове вид-во НАУ, 2014. 192 с.

УДК 504.06

DOI <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2020.115.41>

## ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УПРАВЛІННЯ ПРИРОДНО-РЕСУРСНИМ ПОТЕНЦІАЛОМ

**Стратічук Н.В.** – к.е.н., доцент кафедри екології та сталого розвитку імені професора Ю.В. Пилипенка, Херсонський державний аграрно-економічний університет

У статті викладено поняття природно-ресурсного потенціалу, проблеми його економічної оцінки, результати аналізу теоретико-методологічних і методичних підходів до економічної оцінки природних ресурсів і природно-ресурсного потенціалу (ПРП).

Природно-ресурсний потенціал території є одним із визначальних факторів розвитку економіки і соціальної сфери регіону, що робить актуальним проведення його еколого-економічної оцінки.

Встановлено, що проблема економічної оцінки природно-ресурсного потенціалу в межах певної території належить до найбільш складних і малорозроблених в аспекті її науково-методичного вирішення. Така оцінка є основою побудови ефективного економічного механізму регіонального природокористування, націленого на вдосконалення економічних методів стимулювання ресурсозбереження, через використання адекватної системи платежів за забруднення навколишнього середовища та інших інструментів. Крім того, включення природних ресурсів у баланс економічних активів території сприяє стійкому розвитку.

Також у статті визначено, що одним з інструментів управління природно-ресурсним потенціалом є моніторинг навколишнього природного середовища. Важливим новітнім інструментом моніторингових досліджень нині стають географічні інформаційні системи (ГІС).

Результати проведеного дослідження дали змогу виділити основні проблеми у сфері фінансового забезпечення охорони навколишнього природного середовища й окреслити шляхи їх вирішення. Означено практичні напрями використання результатів економічної оцінки ПРП.

Запропоновано оцінювати ефективність управління природно-ресурсним потенціалом через показник ресурсоємності, тобто загальну кількість ресурсів, які були використанні для виробництва продукції.

**Ключові слова:** природно-ресурсний потенціал, оцінка природних ресурсів, екологічний податок, екологічні фонди, навколишнє середовище.

### **Stratichuk N.V. Assessment of environmental efficiency of natural resource potential management**

The article presents the concept of natural resource potential, the problems of its economic evaluation, the results of the analysis of existing theoretical and methodological and procedure approaches to the economic evaluation of natural resources and natural resource potential.

The natural resource potential of the territory is one of the determining factors in the development of the economy and social sphere of the region, which makes it relevant to conduct its environmental and economic assessment.