

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.11.100>

УДК 504.062:504.064

**М.О. Попов<sup>1</sup>, О.В. Альохіна<sup>2</sup>, Б.П. Русин<sup>2</sup>,  
В.В. Кошовий<sup>2</sup>, О.Л. Івантишин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі  
Інституту геологічних наук НАН України”, Київ

<sup>2</sup> Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів  
E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua, alokhina2011@gmail.com

## **Системний аналіз функціонування екосистем природоохоронних територій в умовах активізації впливу природно-антропогенних чинників**

*Представлено членом-кореспондентом НАН України М.О. Поповим*

*На основі системного підходу розглянуто проблему функціонування екосистем природоохоронних територій в умовах активізації сумісного впливу природних і антропогенних чинників. Показано, що в цих умовах сучасні технології управління не завжди забезпечують належний рівень оцінювання екологічного стану і релевантного реагування на його негативні зміни. Запропоновано підхід до побудови систем оцінювання екологічного стану територій цього класу і розглянуто його інформаційні та методологічні аспекти. Як приклад застосування запропонованого підходу наведена ГІС-орієнтована інформаційно-аналітична система, призначена для реалізації адаптивного управління станом природного середовища біорезервату ЮНЕСКО “Шацький”.*

**Ключові слова:** *природоохоронна територія, природне середовище, екологічний стан, природні та антропогенні фактори впливу, адаптивне управління, ГІС-орієнтована інформаційно-аналітична система.*

Природоохоронні території, як об’єкти природно-заповідного фонду, відіграють одну із ключових ролей у формуванні навколишнього середовища, збереженні стійкості екосистеми та забезпеченні екобезпеки території [1–3], підтримуючи саморегуляцію екологічних процесів, збереження генетичного різноманіття і екологічну стабільність прилеглих територій. Однак у даний час практично для кожного з об’єктів природно-заповідного фонду існує низка проблем, які перешкоджають їх стабільному розвитку. Серед них виділяють активізацію впливу природно-кліматичних та антропогенних чинників (ПКЧ/АТЧ), яка зумовлює інтенсифікацію стресових навантажень на природні комплекси при практичній відсутності технологій адаптивного реагування на зміни, зумовлені дією цих чинників, що негативно позначається на сталому розвитку і рівні екобезпеки території [3, 4].

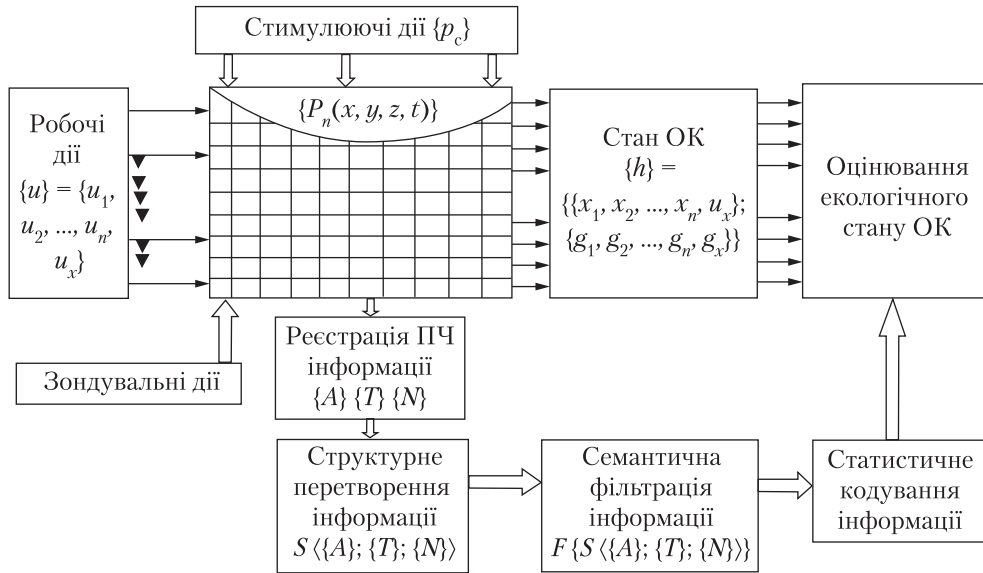
© М.О. Попов, О.В. Альохіна, Б.П. Русин, В.В. Кошовий, О.Л. Івантишин, 2019

Стратегії адаптації до впливу ПКЧ/АТЧ досліджують на глобальному і на регіональному рівнях [4]. Сучасний погляд на проблему адаптації акцентує увагу на особливій ролі біотичних механізмів у збереженні стійкості та регулюванні стану екосистем [2]: “...головне завдання людства полягає не стільки у скороченні антропогенних забруднювальних викидів, скільки у збереженні природи планети та забезпеченні біотичних механізмів регулювання, використання та відтворення екосистем”. Ризики деградації або знищення екосистем тісно пов’язані з їх стійкістю, яку розглядають як “здатність зберігати свою структуру і характер функціонування в просторі та часі при зміні умов зовнішнього середовища” [2], оскільки екосистеми у своєму природному розвитку спрямовані до рівноважного стану.

Природне середовище територій природно-заповідного фонду особливо чутливе до впливу ПКЧ/АТЧ, оскільки він сприяє зниженню відновлювальних функцій біосфери, негативно відбивається на клімато- та водорегулювальній ролі лісів, гідрології територій, водності річок, озер тощо. Тому трансформаційні процеси в екосистемах, зумовлені активізацією впливу ПКЧ/АТЧ, вимагають розроблення технологій адаптивного реагування на їх наслідки, які є загрозливим викликом для цього класу територій і потребують окремих досліджень. Адекватним полігоном для їх проведення є території Західного Полісся завдяки особливій ролі регіону у формуванні клімату, великій водонасиченості його території, незначній кількості джерел техногенного впливу, суттєвій відмінності у характері впливу різних чинників на трансформаційні процеси в екосистемах. Одна з таких відмінностей полягає в тому, що ПКЧ здійснюють інтегральний (у просторі) і тривалий (у часі) вплив, а АТЧ – більш швидкоплинний і локалізований у часі та просторі вплив, формуючи “деградаційні метастази” різної протяжності і форми в околі джерела.

Сучасні методи моніторингу і технології управління, що застосовують на природоохоронних територіях, не завжди забезпечують належний рівень оцінювання екологічного стану (ОЕС) компонентів природного середовища і можливість адаптивного реагування на його негативні зміни. Мета даного дослідження – висвітлити новий підхід до побудови систем ОЕС природоохоронних територій, який ґрунтується на результатах системного аналізу процесу функціонування екосистем і широкому застосуванні перспективних інформаційних технологій, що забезпечує високі показники інформативності, достовірності та оперативності відбору і обробки екологічної інформації, дає змогу прогнозувати зміни екологічної ситуації та створює умови для застосування технологій адаптивного реагування на негативну динаміку цих змін в умовах активізації впливу ПКЧ/АТЧ [5].

**Інформаційні аспекти методології ОЕС.** Система ОЕС повинна забезпечити визначення динаміки зміни негативних наслідків впливу ПКЧ/АТЧ на природне середовище в умовах коливань його інтенсивності та отримання інформації, необхідної для розроблення заходів щодо їх мінімізації. Ці коливання можуть бути незначні або критичні, коли створюються нові умови для функціонування екосистеми. Цей вплив стимулює накопичення певних відмінностей у стані екосистеми від деякого умовно ідеального стану, в якому процеси внутрішнього управління превалюють, забезпечуючи екологічну стійкість. Тобто процедура ОЕС природного об’єкта передбачає вжиття певних контрольно-діагностичних заходів, завдання яких – отримання інформації про динаміку цього стану на різних етапах функціонування об’єкта. Відмінності у стані екосистеми визначаються сукупністю фізичних, хімічних та інших процесів і явищ, які необхідно виявити та ідентифікувати з пев-



Інформаційно-енергетична модель процедури оцінювання екологічного стану природних об'єктів

ною ймовірністю і точністю, щоб сформувати науково обґрунтований прогноз щодо розвитку та стабілізації деградаційних процесів внаслідок впливу ПКЧ/АТЧ. Тому процедуру ОЕС доцільно розглядати, з одного боку, як *елемент процесу функціонування екосистеми* на різних стадіях, а з іншого — як *контрольно-діагностичний процес* (КДП), який визначає її стан на кожній стадії [6, 7].

При такому підході основні компоненти процесу ОЕС термінологічно можна визначити таким чином: 1) *природне середовище* (в цілому або його компонент) — це “об’єкт контролю”; 2) *відмінності* поточного екологічного стану об’єкта від деякого його ідеального — “порушення природних функцій”; 3) *наслідки* впливу ПКЧ/АТЧ, зареєстровані давачами, — сигнали “об’єкта контролю”. При цьому апіорі допускаємо, що умовно ідеальний природний об’єкт завжди знаходиться в ядрі природоохоронної території, де відсутні антропогенні впливи, і його екологічний стан є типовим для клімату даного регіону, а КДП і процедура ОЕС у цілому — невід’ємна частина процесу функціонування “об’єкта контролю” [5].

З позицій теорії інформації та системного підходу процедури ОЕС і КДП в екології необхідно аналізувати в єдності [7]. КДП доцільно розглядати як сукупність операцій вимірювань і спостережень реакцій “об’єкта контролю” на дії різних чинників, що відповідає суті терміну “комплексний екологічний моніторинг” (КЕМ). Враховуючи вищенаведене, автори пропонують інформаційно-енергетичну модель процедури ОЕС природних об’єктів (рисунок), яка враховує, з одного боку, її складність і цілісність, а з іншого — можливість розділення на простіші елементи, які є незалежними з енергетичної або інформаційної точок зору і можуть реалізовуватися незалежно, але з точки зору кінцевих цілей є взаємозв’язаними і нерозривними. Структура цієї моделі містить п’ять основних елементів: робочі та стимулюючі дії, процес функціонування “об’єкта контролю”, КДП і геоінформаційний аналіз. Зв’язки цих елементів з “об’єктом контролю” і між собою — енергетичні, інформаційні або змішані.

Робочі дії описують комплексом параметрів  $\{u\}$ , які характеризують зовнішній вплив на стан компонентів природного середовища (освітлення, температура, опади тощо). Вони є вхідними для екосистеми та забезпечують її нормальне функціонування і розвиток за умов впливу типових для даного регіону ПКЧ. Параметри  $\{h\}$  характеризують її поточний стан і є вхідними даними для системи ОЕС. Стимулюючі дії  $\{p_c\}$  являють собою вплив тривалих аномальних ПКЧ/АТЧ, які спричинюють або сприяють появі і накопиченню відмінностей у поточному стані конкретної екосистеми (порівняно з типовими для регіону), формуючи стійкі зміни її екологічного стану впродовж тривалого періоду функціонування, зумовлені порушенням внутрішнього управління в екосистемі і зв'язків між її компонентами.

КДП забезпечує отримання інформації, яка визначається множиною параметрів  $\{x_d\}$  або величиною узагальненого параметра  $X_d$  і характеризує можливі стани “об’єкта контролю”, які описуються множиною параметрів  $\{h\}$ . Ця інформація є вхідною для системи геоінформаційного аналізу. Поточне завдання КДП – отримання інформації про стан  $h_i$  “об’єкта контролю”. Кінцева мета КДП і процедури ОЕС в цілому – отримання кількісних або якісних оцінок екологічного стану “об’єкта контролю”. Тобто КДП – це процедура з інформаційними зв’язками, структура якої дає можливість надалі отримувати інформацію про екологічний стан “об’єкта контролю”. Основні інформаційні елементи запропонованої моделі процедури ОЕС природних об’єктів – зондувальні дії, реєстрація, структурне перетворення, семантична фільтрація та статистичне кодування інформації – наведено на рисунку.

Реальна екосистема – просторово неоднорідна, анізотропна і динамічна структура, властивості і просторово-часовий розподіл параметрів  $\{P_n\}$  якої визначені множиною функцій  $\{P_n(x, y, z, t)\}$  (див. рисунок), а виявлення та оцінювання відмінностей параметрів  $\{P_n\}$  здійснюється засобами КДП (тобто КЕМ) і фіксується 4D-сіткою, накладеною на “об’єкт контролю”. У сталому режимі при відсутності активізації впливу ПКЧ/АТЧ робочі дії  $\{u\}$  на його вході спричинюють розподіл  $\{P_n\}$ , а множини власних  $\{x_n\}$  і головних  $\{g_n\}$  параметрів описують його стан.

Зондувальні та стимулюючі дії істотно різняться. Перші – інформаційні і їх використовують для оцінювання параметрів стану екосистеми. Другі, у прогнозованій тривалості часу, спричинюють появу незворотних відмінностей у стані екосистеми, яка виведена із режиму саморегуляції, призводять до появи відхилень від типового (для регіонального клімату) стану реальної екосистеми і спричинюють зміни, які відчутно впливають на її функціональні властивості. Процедуру ОЕС екосистеми засобами КДП необхідно проводити на всіх стадіях її функціонування, а відмінності бажано виявляти якомога раніше, щоб уникати додаткових витрат на ренатуралізацію, яка є різновидністю стимулюючих дій і яку використовують для здійснення цільового впливу на екосистему з використанням АТЧ або біотичних чинників.

Динаміка зміни екологічного стану екосистеми залежить від її стійкості до впливу ПКЧ/АТЧ. Виділяють декілька її форм: *інертність*, *відновлюваність*, *пластичність* [3, 5]. Навантаження на екосистему можливе до певних меж. Його зняття призводить до її повернення в попередній стан завдяки природній саморегуляції. Однак можливі і непродумані рішення, одним із прикладів якого було проведення меліорації і осушування боліт Західного Полісся,

що спричинило катастрофічне зниження рівня ґрунтових вод на 1,0–1,8 м та інтенсифікацію процесів деградації екосистеми.

В екології джерелом вхідної інформації для КДП є природні процеси (фізичні, хімічні, фізіологічні та інші) в компонентах екосистеми, які відбуваються внаслідок: а) дії типових для регіону ПКЧ (сонячна енергія, типові атмосферні процеси); б) активізації впливу ПКЧ/АТЧ, які стимулюють процеси незворотної деградації екосистеми (аномальні регіональні кліматичні зміни, видобуток копалин, порушення у ландшафтах внаслідок ерозії, карстоутворення, підтоплення, промислового забруднення); в) дії зондувальних фізичних полів, які найчастіше є слабоенергетичними і в процесі взаємодії з компонентами екосистеми не змінюють їх стан.

Відбір інформації засобами КДП здійснюють з використанням різних методів КЕМ. Зондувальні дії – це фізичні поля і випромінювання, проникна здатність яких достатня для формування зворотної реакції, реєстрованої давачем. Їх вид і параметри вибирають залежно від умов та завдань моніторингу так, щоб забезпечити необхідні чутливість, просторову, часову і спектральну розрізняльну здатність засобів КЕМ. Тобто фізичні процеси в “об’єкті контролю”, стимульовані робочими, стимулюючими і зондувальними діями, – це джерело інформації та відправна точка процедури ОЕС. Інформаційні особливості процедури реєстрації інформації: *дистанційність*, що вимагає врахування впливу середовища на поширення сигналів; *обмеженість*, оскільки давач відсікає частину інформації. Отриману в процесі реєстрації 3D-сукупність амплітудно-часово-просторових параметрів сигналів представляють множинами величин сигналів  $\{A\}$ , моментів часу фіксації їх величин  $\{T\}$  і номерів точок реєстрації  $\{N\}$ . Інформацію, необхідну для реалізації процедури ОЕС, отримують шляхом реконструкції 3D-розподілу зареєстрованих у результаті КДП параметрів і виконання подальших перетворень.

*Впорядкування* множини поздовжньо-поперечних асоціацій сигналів  $\{A\}$ ,  $\{T\}$ ,  $\{N\}$ , тобто їх *структурне кодування*. Ця операція описується як  $S\langle\{A\};\{T\};\{N\}\rangle=\langle\{A\}_N;\{T\}\rangle=\langle\{A\}_T;\{N\}\rangle$  і не відсікає, а впорядковує інформацію в просторі і часі, де  $S$  – оператор структурного перетворення,  $\{A\}_N$  – поперечна асоціація величин усіх сигналів у фіксований момент часу ( $N$ -каналний давач),  $\{A\}_T$  – поздовжня асоціація величин одного фіксованого сигналу в усі моменти фіксації (просторове сканування одним давачем).

*Семантична фільтрація* впорядкованої системи сигналів – це зворотне перетворення впорядкованої інформації, яке враховує цілі і задачі КДП і описується як  $F^{-1}\{S\langle\{A\};\{T\};\{N\}\rangle\}$ . В екології для оцінювання ступеня деградації локальної екосистеми завдання КДП формують як отримання інформації про зміни її властивостей, розмірів та функціональної здатності. Якщо актуальним є експрес-оцінювання стану, то використовують деякий параметр  $X$ , який описує цей стан у мінімальній за розмірністю формі. Наприклад, це може бути відносна зміна морфометричної характеристики водойми, яка корелює із ступенем її евтрофікації [8, 9].

*Статистичне кодування* – етап обробки результатів КДП, на якому відсікають інформацію в структурному сенсі, але зберігають об’єм її семантики і враховують статистику розподілу значень параметрів та їх сукупності, що дає змогу зменшити об’єм пам’яті для зберігання результатів і скорочує час на їх подальший аналіз. Приклад – діагностика стану екосистеми за зміною кольору космознімка без ідентифікації її екологічних параметрів.

Таким чином, інформаційна оптимізація КДП в екології зводиться до синтезу узагальненого інформаційного параметра, який визначає стан екосистеми з позицій її функціонування та екобезпеки і формується в процесі КЕМ. Під час вибору методу моніторингу і розроблення моделі “об’єкта контролю” необхідно враховувати цілі діагностування через семантику параметрів.

**Методологічні аспекти процедури ОЕС.** КДП, як один із основних елементів процедури ОЕС, необхідно розглядати, з одного боку, як інформаційний процес відбору інформації про наявність і параметри відмінностей реального стану екосистеми від типового для регіону, а з іншого, як фізичний процес, у рамках якого зондувальне поле взаємодіє з “об’єктом контролю”. Інформаційна модель процедури ОЕС містить такі елементи:

1) джерело інформації — досліджувана область екосистеми як об’єкт контролю, в якій необхідно встановити наявність або відсутність відмінностей її реального стану від типового для даного регіону;

2) джерело носія інформації — випромінювання певної фізичної природи, що поширюється і взаємодіє з компонентами природного середовища;

3) просторово-часовий сигнал — носій інформації про властивості досліджуваної області “об’єкта контролю”, який поширюється за її межі;

4) кодування інформації — перетворення сигналу при його поширенні в зовнішньому середовищі за межі досліджуваної області;

5) приймач інформації — давач, який забезпечує реєстрацію просторово-часового розподілу параметрів фізичного поля, а його структура (одноканальна або багатоканальна) залежить від алгоритмів обробки інформації і реалізує ті чи інші способи сканування;

6) декодування інформації — відновлення інформативних ознак сигналу, на основі яких ідентифікують параметри стану досліджуваної області “об’єкта контролю”;

7) одержувач інформації — система діагностування, в яку (залежно від виду представлення інформативних ознак) можуть бути включені людина-оператор або автомат, що приймає рішення про наявність відмінностей, а також математичні моделі, обчислювальні алгоритми і технічні засоби, що забезпечують визначення екологічного стану “об’єкта контролю”;

8) еквівалентні завади — сукупність завад від різних джерел: флуктуації параметрів зондувального поля, структурні завади і фальшиві сигнали, зумовлені геометрією “об’єкта контролю”, стохастичним характером середовища поширення сигналу, перетворенням виду носія інформації, наводки і шуми, зовнішній фон сторонніх полів і випромінювань.

Ця модель має позиційну впорядкованість елементів і структуру розімкненої системи передачі інформації, у якій передача інформації без втрат можлива лише за дотримання основної і необхідної умови — узгодження інформаційної просторово-часової пропускну здатності  $P_c$  системи ОЕС з інформаційною просторово-часовою продуктивністю  $P_o$  досліджуваної екосистеми як джерела інформації [7]:

$$P_c > P_o. \quad (1)$$

Кількість інформації  $I_{ot,s}$ , яку містить, як її джерело, кадр просторово-часового процесу сканування досліджуваної області “об’єкта контролю”, та інформаційну продуктив-

ність джерела  $\Pi_{ot,s}$  (кількість інформації, генерованої одиницею площі в одиницю часу) визначають як

$$I_{ot,s} = TS\Delta f_t \Delta f_s \log_2(1+1/\delta_o^2), \quad \Pi_{ot,s} = \Delta f_t \Delta f_s \log_2(1+1/\delta_o^2),$$

де  $T$  – тривалість кадру, тобто час одного скану в процесі моніторингу досліджуваної області екосистеми;  $S = L_x L_y$  – площа досліджуваної області екосистеми;  $\Delta f_s$  і  $\Delta f_t$  – смуги просторових і часових частот процесу, який характеризує зміну параметрів стану екосистеми;  $\Delta f_t = 1/T$ ;  $\Delta f_s = 1/S$ ;  $\Delta f_s = (l_{x,y})^{-1}$ , де  $l_x$  і  $l_y$  – просторове розрізнення по координатах;  $\Delta f_s = \Delta f_x \Delta f_y$ ,  $\delta_o = \delta_{so} + \delta_{to}$  – просторова і часова складові флуктуацій поля.

Аналізуючи  $\Pi_o$  екосистеми, необхідно враховувати її розміри, геометрію, складність і неоднорідність структури та просторово-часові і спектральні характеристики, беручи до уваги метод і продуктивність моніторингу, параметри зондувальних і стимулюючих дій, вибраний вид і характеристики вихідної інформації (зображення, спектр тощо), величину мінімальних відмінностей, що підлягають виявленню, розкид параметрів середовища поширення тощо.

$\Pi_c$  системи ОЕС, включно із системою моніторингу, визначають за просторово-часовою розрізнявальною здатністю, продуктивністю, чутливістю, кількістю каналів реєстрації тощо. Згідно з умовою (1) високій величині  $\Pi_o$  екосистеми повинна відповідати висока величина  $\Pi_c$  системи ОЕС, що вимагає значного підвищення складності, об'єму і вартості обладнання цієї системи. За час моніторингу часові зміни екологічної ситуації незначні, а параметри поля, яке відображає стан екосистеми, не змінюються впродовж одного циклу сканування. Тому для визначення  $\Pi_o$  і  $\Pi_c$  достатньо враховувати кількість лише просторової інформації, генерованої екосистемою  $I_o = L_x L_y \Delta f_x \Delta f_y \log_2(1+1/\delta_o^2)$ . Тоді її інформаційна продуктивність  $\Pi_o = I_o / L_x L_y = \Delta f_x \Delta f_y \log_2(1+1/\delta_o^2)$ , де  $\delta_o = p_{\min} / p_{\max}$ ,  $p_{\min} / p_{\max}$  – мінімальне / максимальне значення вимірюваної величини, за якою визначають стан екосистеми;  $\delta_c = \Delta p / p_{\max}$  – відносна, а  $\Delta p$  – абсолютна похибки передачі інформації. У разі рівномірної статистики  $\Pi_c = \Delta f_x \Delta f_y \log_2(1+1/\delta_c^2)$ .

Умова (1) визначає методологію оптимізації системи ОЕС, яка ґрунтується на принципі відповідності характеристик системи задачам діагностування стану конкретного “об’єкта контролю”. Суть принципу – *прості задачі ОЕС не повинні вирішуватися складними або дорогавартісними системами і методиками*, оскільки вартість діагностування при цьому значно зростає, результат не покращиться, а остаточна вартість процедури ОЕС виросте настільки, що її застосування просто буде не вигідним. Наприклад, якщо метою процедури ОЕС є визначення ступеня деградації локальної екосистеми, а в методику його розрахунку закладена лише максимальна величина відхилення певного параметра екосистеми, то застосовувати систему моніторингу з високим просторовим розрізненням вже недоцільно. Така методологія дає змогу підвищити якість і зменшити затрати на проведення процедури ОЕС. Ці вимоги суперечать одна одній, але умова (1) передбачає можливість компромісного рішення.

Таким чином, оптимізація процедури ОЕС залежить від конкретної екологічної задачі і повинна включати такі етапи: вибір фізичного методу моніторингу і типу зондувальних дій, моменту часу і області зондування; оптимізація параметрів КДП для вибраного методу реє-

страції реакції “об’єкта контролю” на зондувальні дії; вибір критерію виявлення змін стану екосистеми; оцінювання екологічного стану досліджуваної області “об’єкта контролю”.

**Практичне застосування методології** апробовано у біорезерваті “Шацький”, який презентує українську частину транскордонного біорезервату ЮНЕСКО “Західне Полісся” [10, 11]. На даний час рівень управління цією територією з метою забезпечення її сталого розвитку не відповідає сучасним вимогам через розбіжності в екологічному праві країн, складність формування спільних цілей і механізмів ОЕС, відсутність впроваджених технологій адаптивного реагування на активізацію впливу ПКЧ/АТЧ, недостатній рівень впровадження системного підходу, перспективних ІТ та сучасних засобів ОЕС при високому різноманітті компонентів природного середовища.

У сучасній світовій практиці технології адаптивного реагування на зміни стану природного середовища територій природно-заповідного фонду в умовах активізації сумісного впливу ПКЧ/АТЧ ще недостатньо розвинуті і, головне, мало застосовуються. Приклад — Європейський проект НАВІТ-CHANGE, що передбачав дослідження природоохоронних територій Центральної і Східної Європи (в/б угіддя, ліси, луки і високогір’я), зокрема і територію біорезервату “Шацький” [4]. Але в результаті його виконання сформульовані рекомендації щодо адаптації до впливу лише кліматичних змін як загрози біорізноманіттю. Впровадження на природоохоронних територіях концепції сталого розвитку і адаптивного управління вимагає її адаптації до конкретних територій. Авторами роботи проведено комплекс досліджень з проблеми сталого розвитку і забезпечення екобезпеки території біорезервату “Шацький” [9] і отримано такі результати:

1) визначено існуючі і потенційно небезпечні чинники впливу на природне середовище біорезервату, що створюють загрози для екологічної стабільності, біорізноманіття і стану екобезпеки цієї території;

2) оцінено рівень сталого розвитку території біорезервату на основі методології SWOT-, TOWS- і PESTM-аналізу та системи індексів сталого розвитку (економічного  $I_{екв}$ , екологічного  $I_{ев}$  та соціального  $I_{св}$ ), за якими розраховано інтегральний індекс  $I_{ср} \approx 0,93$  [12];

3) оцінено стан екобезпеки території біорезервату в сучасних умовах активізації впливу ПКЧ/АТЧ на основі розрахунку показників екобезпеки  $K_{рд}$  і  $K_{срд}$  та інтегрального показника екобезпеки  $K = 1/n \sum_{i=1}^n x_i k_i$ , які дають уявлення

про силу впливу на природні комплекси або лише робочих дій (перманентні природно-кліматичні впливи), або сумісного впливу стимулюючих (аномальні природно-антропогенні впливи) і робочих дій за бальною шкалою 0–100, де 0 — відсутність впливу, а 100 — максимальна сила впливу,  $n$  — сукупна кількість робочих і стимулюючих дій,  $x_i$  — сила впливу кожної дії (за бальною шкалою),  $k_i$  — ваговий коефіцієнт кожної дії. Результати оцінювання (таблиця) підтверджують, що найбільш чутливі до впливу поступових змін ПКЧ (за коефіцієнтом  $K_{рд}$ ) ґрунтові води, флора, водно-болотні

**Показники екобезпеки території біорезервату “Шацький”**

Природні комплекси	$K_{срд}$	$K_{рд}$
Поверхневі води	52	4
Ґрунтові води	76	7
Лісовий комплекс	71	4
Водно-болотний комплекс	38	11
Ґрунти	42	1
Флора	72	5
Фауна	63	3



комплекси, а до сумарного впливу активізації ПКЧ/АТЧ (за коефіцієнтом  $K_{срд}$ ) — ґрунтові води, лісові комплекси, флора і фауна.

Фактичне значення індексу сталого розвитку  $I_{ср}$  свідчить про високий, але недостатній ступінь гармонізації сталого розвитку природоохоронної території біорезервату “Шацький”. Тому з використанням вищенаведеної методології сформульовано стратегію адаптивного управління цією природоохоронною територією в умовах активізації впливу ПКЧ/АТЧ з метою забезпечення її сталого розвитку. Для реалізації цієї стратегії створено і впроваджено відповідний механізм, а саме: ГІС-орієнтовану інформаційно-аналітичну систему ОЕС природного середовища [13]. Для створення ГІС використано значний обсяг первинних даних, результатів польових спостережень і даних дистанційного зондування Землі, накопичених у процесі 35-річного функціонування біорезервату.

Таким чином, вперше за результатами проведеного системного аналізу функціонування екосистем природоохоронних територій та на основі запропонованої методології сформульовано стратегію управління, обґрунтовано структуру, створено і впроваджено постійно функціонуючу ГІС-орієнтовану інформаційно-аналітичну систему оцінювання екологічного стану природного середовища біорезервату ЮНЕСКО “Шацький”, що дає можливість реалізувати адаптивне управління його станом в умовах активізації сумісного впливу природних і антропогенних чинників.

*Публікація містить результати досліджень, проведених, у тому числі, і за підтримки Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018–2022 рр. за проектом “Кронос 2018–2022”: “Системні дослідження взаємозв’язків між сонячними, геофізичними (геомагнітне, геоелектричне та природне інфразвукове поля) та екологічними процесами на основі даних українських та міжнародних космічних місій і наземної інструментальної та польової інфраструктури”.*

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Екологічна безпека територій: Адаменко О.М., Адаменко Я.О. (ред.). Івано-Франківськ: Голіней, 2014. 361 с.
2. Дідух Я.П. Новий підхід до оцінки стійкості та ризиків втрати екосистем. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2014. № 8. С. 149–155. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.08.149>
3. Гродзинський М.Д. Стійкість геосистем до антропогенних навантажень. Київ: Лікей, 1995. 233 с.
4. Managing protected areas in Central and Eastern Europe under climate change: Rannow S., Neubert M. (Eds.). Dordrecht: Springer, 2014. 305 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7960>
5. Джефферс Дж. Введение в системный анализ: применение в экологии. Москва: Мир, 1981. 256 с.
6. Казачинский В.М., Пичугина А.Е. Качественная оценка контрольно-диагностической информации / Одес. политехн. ин-т. Одесса, 1984. 15 с. Деп. в УкрНИИИТИ 27.12.84, № 2214–Ук84.
7. Беленький Я.Е., Кошевой В.В. Системы пространственно-временного проеобразования информации. Киев: Наук. думка, 1979. 252 с.
8. Кошовий В.В., Цихан О.І., Бухало О.П., Романишин І.М. До оцінки трофічного стану озер на основі морфометричних параметрів. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2001. № 11. С. 198–201.
9. Альохіна О.В., Горбань І.М., Ященко П.Т., Піць Н.А. Еволюція стану екосистем біорезервату ЮНЕСКО “Шацький” в умовах інтенсифікації впливу кліматичних змін та антропогенних факторів. *Природа Західного Полісся та прилеглих територій.* 2014. № 11. С. 101–108.
10. Створення транскордонного біосферного резервату та регіональної мережі в Поліссі (Білорусь / Польща / Україна: Дідух Я.П., Черінько П.М. (ред.). Київ: Нац. Комітет України з програми ЮНЕСКО “Людина і біосфера”, 2008. 127 с.

11. Три полісся – спільна стратегія охорони і екологічного використання природної спадщини теренів польсько-білорусько-українського прикордоння: Матюнін С., Косцьцельський П. (ред.). Брест: ПП Телеш, 2009. 82 с.
12. Alokhdina O., Pits N. SWOT-analysis of the Shatsk National Natural Park: nature resources potential. *Nature and Landscape Monitoring System in the West Polesie Region*. Lublin: University of Life Sciences in Lublin, Inst. of Agrophysics of PAS, 2009. P. 96–108.
13. Панасюк В.В., Лялько В.І., Дідух Я.П., Кошовий В.В., Попов М.О., Муравський І.Л., Мельничок Л.С., Горбань І.М., Альохіна О.В., Курсіж І.Й., Ліщенко Л.П., Козлова А.О., Станкевич С.А., Дугін С.С., Фіцайло Т.В., Пашкевич Н.А. ГІС для дослідження екосистем Шацького національного природного парку та управління ними з метою забезпечення сталого розвитку заповідних територій. *Цільова комплексна програма фундаментальних досліджень “Наукові основи, методичне, технічне та інформаційне забезпечення створення системи моніторингу геосистем на території України (GEO-UA)”*: Зб. наук. звітів / НАН України. Київ, 2010. С. 108–127.

Надійшло до редакції 18.07.2019

## REFERENCES

1. Adamenko, O. M. & Adamenko, Ya. O. (Eds.) (2014). Ecological security of territories. Ivano-Frankivsk: Holinei (in Ukrainian).
2. Didukh, Ya. P. (2014). A novel approach to the assessment of the stability and the risks of losses in ecosystems. *Dopov. Nac. acad. nauk Ukr.*, No. 8, pp. 149-155 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.08.149>
3. Grodzinsky, M. D. (1995). Stability of geosystems to anthropogenic loads. Kyiv: Likei (in Ukrainian).
4. Rannow, S. & Neubert, M. (Eds.). (2014). Managing protected areas in Central and Eastern Europe under climate change. Dordrecht: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7960>
5. Jeffers, J. N. R. (1981). An introduction to systems analysis: with ecological applications. London: Edvard Arnold.
6. Kazachinsky, V. M. & Pichugina, A. E. (1984). Qualitative evaluation of control and diagnostic information. *Odessa: Odessa Polytech. Inst. Dep. in UkrNIINTI 27.12.84*, No. 2214–Uk84 (in Russian).
7. Belenkyi, Ya. E. & Koshevoy, V. V. (1979). Systems of spatio-temporal transformation of information. Kyiv: Naukova Dumka (in Russian).
8. Koshovyy, V. V., Tsykhan, O. I., Bukhalo, O. P. & Romanyshyn, I. M. (2001). To estimation of trophic state of lakes on the basis of morphometric parameters. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, No. 11, pp. 198-201 (in Ukrainian).
9. Alokhdina, O. V., Gorban, I. M., Yaschenko, P. T. & Pits, N. A. (2014). The evolution of an ecosystems state of the Biosphere Reserve UNESCO “Shatsky” in conditions of an intensification of the effect of climate change and anthropogenic factors. *Priroda Zakhidnoho Polissya i prylehlykh terrytoriy*, No. 11, pp. 101-108 (in Ukrainian).
10. Didukh, Ya. P. & Cherin'ko, P. M. (Eds.). (2008). Creation of the transboundary biosphere reserve and a regional network in Polissya (Belarus / Poland / Ukraine). Kyiv: Nat. Committee of Ukraine on the UNESCO Program “Man and the Biosphere” (in Ukrainian).
11. Matyunin, S. & Kos'tseletskyi, P. (Eds.). (2009). Three Polesies – a joint strategy for the protection and ecological use of the natural heritage of the Polish-Belarusian-Ukrainian borderland. Brest: PE Telesh.
12. Alokhdina, O. & Pits, N. (2009). SWOT-analysis of the Shatsk National Natural Park: nature resources potential. *Nature and Landscape Monitoring System in the West Polesie Region* (pp. 96-108). Lublin: University of Life Sciences in Lublin; Inst. of Agrophysics of PAS.
13. Panasyuk, V. V., Lyal'ko, V. I., Didukh, Ya. P., Koshovyy, V. V., Popov, M. O., Muravskyy, I. L., Mel'nychok, L. S., Horban', I. M., Alokhdina, O. V., Kursish, I. Yo., Liszhenko, L. P., Kozlova, A. O., Stankevych, S. A., Dugin, S. S., Fitsailo, T. V. & Pashkevych, M. A. (2010). GIS to study the ecosystems of the Shatsk National Nature Park and manage them in order to ensure the sustainable development of protected areas. Targeted complex program of fundamental researches “Scientific foundations, methodological, technical and information support for the establishment of a geosystem monitoring system in Ukraine (GEO-UA)”: A collection of scientific reports (pp. 108-127). Kyiv: NAS of Ukraine (in Ukrainian).

Received 18.07.2019

М.А. Попов<sup>1</sup>, О.В. Алехина<sup>2</sup>, Б.П. Русин<sup>2</sup>,  
В.В. Кошовый<sup>2</sup>, О.Л. Ивантишин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли  
Института геологических наук НАН Украины”, Киев

<sup>2</sup> Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, Львов  
E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua, alokhina2011@gmail.com

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ ПРИРОДООХРАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ В УСЛОВИЯХ АКТИВИЗАЦИИ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

На основе системного подхода рассмотрена проблема функционирования экосистем природоохранных территорий в условиях активизации совместного влияния природных и антропогенных факторов. Показано, что в этих условиях современные технологии управления не всегда обеспечивают должный уровень оценки экологического состояния и релевантного реагирования на его негативные изменения. Предложен подход к построению систем оценивания экологического состояния территорий этого класса и рассмотрены его информационные и методологические аспекты. В качестве примера применения предлагаемого подхода приведена ГИС-ориентированная информационно-аналитическая система, предназначенная для реализации адаптивного управления состоянием природной среды биорезервата ЮНЕСКО “Шацкий”.

**Ключевые слова:** природоохранная территория, природная среда, экологическое состояние, природные и антропогенные факторы влияния, адаптивное управление, ГИС-ориентированная информационно-аналитическая система.

М.О. Попов<sup>1</sup>, О.В. Алюхина<sup>2</sup>, Б.П. Русин<sup>2</sup>,  
В.В. Кошовый<sup>2</sup>, О.Л. Ивантишин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth  
of the Institute of Geological Science of the NAS of Ukraine, Kyiv

<sup>2</sup> Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, Lviv  
E-mail: koshovy@ipm.lviv.ua, alokhina2011@gmail.com

## SYSTEM ANALYSIS OF THE FUNCTIONING OF ECOSYSTEMS OF NATURAL PROTECTED TERRITORIES UNDER CONDITIONS OF THE ACTIVATION OF THE INFLUENCE OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS

The problem of the functioning of ecosystems of protected areas under conditions of the activity of natural and anthropogenic factors has presented with the use of the system approach. It is shown that, under these conditions, modern management technologies do not always provide an adequate level of environmental assessment and relevant response to its negative changes. The approach to the construction of systems of assessment of the ecological status of territories of this class is proposed, and its informational and methodological aspects are considered. An example of application of the proposed approach is the GIS-oriented information – analytical system designed for the implementation of adaptive management of the state of the natural environment of the Biosphere Reserve UNESCO “Shatskyi”.

**Keywords:** natural protected territory, natural environment, ecological state, natural and anthropogenic factors, adaptive management, GIS-oriented information-analytical system.