

УДК 528.8.04

**Л. В. Підгородецька<sup>1,2</sup>, Л. М. Зуб<sup>3</sup>, О. Д. Федоровський<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Національного космічного агентства України, Київ

<sup>2</sup> Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ

<sup>3</sup> Інститут зоології ім. І. І. Шмальгаузена Національної академії наук України, Київ

## **ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ КОСМІЧНОГО ГЕОМОНІТОРИНГУ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДОЙМ НА ПРИКЛАДІ ОЗЕРА СВІТЯЗЬ**

---

*На прикладі дослідження озера Світязь (Шацький національний природний парк) обґрунтовано використання інформації космічного геомоніторингу для оцінки екологічного стану водойми шляхом виявлення зв'язку експертних оцінок стану водойми з критерієм, який характеризує параметри (клас і площу) мікроландшафту, що добре простежуються на космічних знімках, а також здійснено моделювання та прогноз впливу рекреаційного навантаження на можливі екологічні наслідки.*

---

### **ВСТУП**

Для більшості водойм стан водної рослинності служить своєрідним індикатором екологічного стану водного середовища [1, 9]. Вивчення загальної картини заростання водойми дозволяє виділити в його рослинному покриві певні поєднання рослинних угруповань (фітоценозів), пов'язаних спільністю структурного характеру та однорідністю умов зростання (особливостей рельєфу, активності водних мас, типів ґрунтів тощо). Ці надфітоценотичні територіальні рівні або, інакше кажучи, природні територіальні комплекси (ПТК) є основою ландшафтно-структури водойми, мають свої особливості, закономірності розподілу та піддаються типізації. Перебудова видової і ценотичної структури ПТК фіталі водойми, перерозподіл площ, зайнятих окремими ПТК або окремими угрупованнями в рамках одного ПТК є свідченням змін екологічного стану водного середовища та може служити індикатором посилення антропогенного впливу на водойму. Контури таких ПТК добре простежу-

ються на аеро- і космічних знімках, і при їхньому дешифруванні стають джерелом інформації, яка характеризує екосистему водойми. Тому для систематичного контролю за якісними і кількісними змінами ПТК, разом з моніторингом наземної інформації, використання космічних знімків заслуговує на вагомий науковий інтерес [5]. Це дозволить оперативно одержувати інформацію про зміни видового та ценотичного складу водної рослинності на більших площах [12].

Мета даної роботи полягає в обґрунтуванні та апробації на прикладі озера Світязь (Шацький національний природний парк) використання інформації космічного геомоніторингу для комплексної оцінки екологічного стану водного середовища шляхом виявлення зв'язку експертних оцінок стану водойми з параметром, що характеризує інформативні ознаки ПТК (клас і площу), які надійно дешифруються на космічних знімках, а також у моделюванні екологічних наслідків від змін рекреаційного навантаження.

### **ДЖЕРЕЛА ДАНИХ**

Озеро Світязь (рис. 1) має площу 27.5 км<sup>2</sup>, його максимальна глибина 58 м, прозорість води по-



Рис. 1. Космічний знімок озера Світязь («Landsat ETM+»)

над 5 м. Унікальна екосистема озера, яка формувалася протягом століть, вирізняється водою високої якості (за трофо-сапробіологічними показниками озеро характеризується як мезотрофне,  $\alpha$ -олігосапробне [6]). Сьогодні воно є одним з найбільш популярних об'єктів туризму. В результаті антропогенного навантаження (насамперед рекреаційного) у розвитку біоти водойми протягом останніх п'яти — семи років спостерігаються вкрай негативні тенденції, які ставлять під загрозу існування цієї унікальної екосистеми.

Дослідження видової та ценотичної структури угруповань водних рослин озера Світязь протягом 1986—2009 рр. [2, 3] дозволило виділити на фіталі водойми ряд ПТК рангу мікроландшафту: прибережні чагарниково-болотні, водно-болотні, піщаних мілководь, літоральних заростей очеретів, поясу широколистяних рдесників, харових полів, ізольованих акваторій, деградованих піщаних мілководь.

Для подальших досліджень серед зазначених типів ПТК були обрані ті, що є найбільш показовими індикаторами змін екологічного стану водойми та чітко дешифруються на космічних знімках.

**ПТК1.** Деградовані мікроландшафти піщаних мілководь (глибини поширення 0—1.0 м). Це комплекси, які виникають на прибережних піщаних мілководдях у зонах масового скупчення рекреантів. Їм характерна деградація рос-

линного покриву внаслідок механічного впливу (витоптування, викошування) рекреантами. На таких ділянках угруповання макрофітів (як гідрофітів, так і гідрофітів) дуже розріджені або зникають повністю.

**ПТК2.** Водно-болотні мікроландшафти (глибини 0—0.5 м). Об'єднує прибережні мезо-евтрофні водні комплекси, в яких на мулистих донних відкладеннях формуються багатовидові угруповання високотравних повітряно-водних рослин (гідрофітів) — очеретів та рогозів у поєднанні з болотним різнотрав'ям.

**ПТК3.** Мікроландшафти піщаних мілководь (глибини 0—1.0 м) (непорушені мілководдя). Це оліго-мезотрофні комплекси, що формуються на широких (до 200 м) прибережних піщаних мілководдях з поступовим падінням глибини до 1.0 м. Заростають маловидовими угрупованнями макрофітів, для розвитку яких необхідні щільні піщані донні відкладення.

**ПТК4.** Мікроландшафти літоральних заростей очеретів (глибини 1.0—2.0 м) — це піщані ділянки літоралі озера з глибинами 1—2 м, на яких формуються оліготрофні зарості очерету звичайного (умовно названі нами «водяними очеретами» — на відміну від прибережних евтрофних угруповань цього ж виду). Ці комплекси не контактують з прибережними угрупованнями водно-болотних рослин, угруповання рослин переважно одновидові, розріджені.

Для дешифрування було обрано 11 літніх «безхмарних» знімків з супутників «Landsat TM» та «Landsat ETM+» (липень—серпень 1988, 1989, 1992, 1994, 1999, 2001, 2002, 2003, 2006, 2007 та 2009 рр.). З'ясувалося, що не всі знімки придатні для класифікації ПТК фіталі ізольованих акваторій і глибоководних (5.0—12.0 м) заростей харових водоростей (мікроландшафти харових полів). Розташування цих класів на знімках не завжди відповідало природним глибинам їхнього поширення та зазвичай розподілялося на глибоководних ділянках, характерних для класу ПТК глибоководних ділянок без макрофітів. При більш детальному вивченні цієї проблеми виникло припущення, що спектральні характеристики цих класів збігалися зі спектральними характеристиками брижі на поверхні води.

## МЕТОДИ

Для дешифрування космічних знімків використовувалася методика експертної класифікації багатоспектральних супутникових знімків, що передбачає застосування неконтрольованої класифікації за алгоритмом ISODATA з розбивкою на 13 кластерів, розрахунків NDVI і температури поверхні водойми. Види ПТК, що класифікувалися, визначалися згідно з даними польових спостережень, що проводилися у літній період протягом 1988—2009 рр. [2, 7].

Для оцінки динаміки змін ПТК озера Світязь були використані алгоритми, що складаються з таких етапів [11]: введення функції близькості порівнюваних величин  $a$  і  $b$ , обчислення оцінки для функції близькості ( $S$ ) та функції відповідності ( $F$ ). Ця функція описує ступінь збігу значень порівнюваних величин. Наприклад, порівнюються такі величини, як стан ПТК озера Світязь за всі досліджувані роки відносно стану ПТК в 1988 р.

$$F(B, A) = \sum_{j=1}^n \rho(b_j, a_j) [1 - S(b_j, a_j)], \quad (1)$$

де  $\rho(b_j, a_j)$  — вагові коефіцієнти,  $j = 1, \dots, n$ .

Близькість значення параметра  $a$  до параметра  $b$  визначається за допомогою функції близькості  $S_j(b_j, a_j)$  для таких випадків:

$$S_j(b_j) = (\bar{a}_j - b_j) / \bar{a}_j, \text{ для випадку } b_j < \bar{a}_j, \quad (2)$$

$$S_j(b_j) = (b_j - \bar{a}_j) / b_j, \text{ для випадку } b_j > \bar{a}_j.$$

Тоді класифікація процесів або об'єктів може бути формалізована як завдання багатокритеріальної оптимізації  $m$  критеріїв, кожний з яких виступає як функція відповідності характеристики  $b$  параметру  $a$ .

Для оцінки екологічного стану озера Світязь в 1988—2009 рр. разом із статистичними та архівними даними використовувався метод експертних оцінок, а саме метод аналізу ієрархій [8]. Для цього формулюється цільова функція, яка ділиться на більш прості складові — показники, що об'єднуються у відповідні ієрархічні рівні. Завдання першого рівня полягає у формуванні мети, яка буде досягнута у процесі розв'язання задачі. Коли розглянута проблема представлена ієрархічно, для формалізації експертної про-

цедури будується множина матриць попарних порівнянь для кожного рівня і за кожною складовою даного ієрархічного рівня. Проводиться їхня нормалізація і оцінка векторів пріоритетів з урахуванням ступеню їхнього впливу на складові попереднього рівня. Обробка матриць, наприклад, чотирьох рівнів дає можливість вирахувати вектори пріоритетів відповідних рівнів  $K^1, K^2, K^3$  і  $K^4$ , компоненти яких визначають їхні пріоритети з точки зору експерта.

Метод аналізу ієрархій дозволяє сконструювати необхідну цільову функцію та оцінити ступінь впливу на неї кожної з характеристик досліджуваної системи. Якщо отримано всі необхідні вагові коефіцієнти, то формула згортки узагальненого критерію для порівнюваних варіантів має вигляд:

$$F = \sum K_l^1 \sum K_m^2 \sum K_r^3 \sum K_p^4 \cdot x_p^s, \quad (3)$$

де верхній індекс критеріального пріоритету позначає рівень ієрархії,  $x_p^s$  — коефіцієнт переваги варіанта  $s$  за показником  $p$ .

Значення  $F$  дозволяє встановити переваги того чи іншого альтернативного варіанта системи за всією сукупністю аналізованих факторів. Наприклад, дати порівняльну оцінку екологічного стану озера Світязь за період 1988—2009 рр.

Для прогнозу оцінки змін екологічного стану водойми була використана методика, що базується на принципах системної динаміки [13]. Основною методу є побудова динамічної моделі об'єкта управління на основі експертних даних про причинно-наслідкові зв'язки у модельній системі з подальшим моделюванням процесів розвитку.

Основне рівняння методу виражає баланс тенденцій у зміні значень процесу ( $x$ ), обумовлених впливами на нього з боку інших процесів [10]:

$$\frac{dx_i}{dt} = [1 - 2F^{(+)}(a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n + x_i)]. \quad (4)$$

Рівняння (4) стає найбільш простим у разі вибору базової функції впливів  $F^{(+)}$  у формі параболи, що асимптотично наближається до одиниці. При цьому воно стає лінійним і набуває вигляду

$$\frac{dx_i}{dt} = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{i,i-1}x_{i-1} + a_{i,i+1}x_{i+1} + \dots + a_{in}x_n - x_i, \quad (5)$$

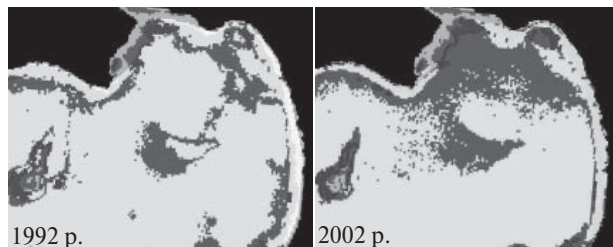


Рис. 2. Фрагменти карт розподілу ПТК озера Світязь у 1992 і 2002 рр. за космічними знімками

де  $t$  — часовий або просторовий аргумент процесу.

Надаючи індексу  $i$  в останньому рівнянні значення  $1, 2, \dots, n$ , при дотриманні умови (4) одержимо систему рівнянь динамічної моделі, яку будемо використовувати далі.

Коефіцієнти впливу  $a_{ij}$  у рівнянні моделі можуть бути ідентифіковані двома основними шляхами: за оцінками експертів і на основі статистичної обробки архівних даних.

У ЦАКДЗ ІГН для моделювання складних систем на основі викладеної теорії розроблено спеціальну програму, яку і використано у даній роботі.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Після дешифрування обраних 11 космічних знімків озера Світязь і визначення меж мікроландшафтів були визначені площі чотирьох зазначених вище типів ПТК за період 1988—2009 рр. (див. таблицю). На рис. 2 представлено два фрагменти зображень озера Світязь, отримані в результаті дешифрування космічних знімків за 1992 і 2002 рр. Зіставлення наведених зобра-

жень дозволяє побачити істотні розходження в розмірах площ, що займають ПТК, які відбулися за десятилітній період.

За статистику критерію, що характеризує екологічний стан водойми за узагальненими параметрами ПТК, була прийнята функція відповідності  $F$ . За допомогою отриманих вище класів і значень площ були обчислені значення  $F$  за період з 1988 по 2009 рр. відповідно до рівняння (1). Значення площ ПТК за 1988 р. приймалися за умовний еталон, відносно якого виконувалися обчислення за наступні роки досліджень. Значення  $F$  наведено в таблиці. Видно, що до 2003 р. відбувається плавне зменшення величини  $F$ , а з 2006 р. вона починає збільшуватися. Враховуючи, що наприкінці минулого століття рекреаційне навантаження на екосистему озера стрімко зростало, тенденцію зменшення функції відповідності можна пояснити як віддзеркалення погіршення екологічної ситуації на водоймі. Збільшення функції відповідності з 2006 р. вказує на результат дії природоохоронних заходів, які почали впроваджувати в Шацькому НПП з 2005 р. (введення в експлуатацію централізованої каналізації, посилення контролю за дотриманням водоохоронних та санітарних норм тощо).

Наступним етапом досліджень стали пошуки зв'язку екологічного стану водойми з показником, який характеризує параметри ПТК (клас і площу), а саме — з функцією відповідності  $F$ . Для цього виконано експертну оцінку екологічного стану озера Світязь за період 1988—2009 рр. на основі методу аналізу ієрархії. Згідно з методом була розроблена ієрархічна система, у якій на нульовому рівні сформульовано головне за-

**Значення площ ПТК (га), функції відповідності  $F$ , нормованого показника екологічного стану ( $OE$ ) і рекреаційного навантаження ( $PH$ )**

Показник	Рік										
	1988	1989	1992	1994	1999	2001	2002	2003	2006	2007	2009
Площа ПТК1	51	94	77	111	82	76	85	121	87	99	84
Площа ПТК2	90	85	87	71	121	79	93	61	137	141	107
Площа ПТК3	147	114	208	150	162	97	98	122	118	111	98
Площа ПТК4	198	180	93	101	122	84	99	111	96	147	140
$F$	1.0	0.80	0.70	0.68	0.72	0.64	0.68	0.59	0.63	0.65	0.70
$OE$	9	8	7	6	4	5	5	4	4	4	5
$PH$	4	4	5	6	9	8	6	7	8	9	8

вдання — оцінка екологічного стану озера Світязь за період 1988—2009 рр. На наступному рівні розташовані *основні джерела впливу* на складові геосистеми озера Світязь, здатні впливати на виконання головного завдання і які можна попарно оцінити відносно нульового рівня. На другому рівні представлено *складові геосистеми* озера, для оцінки яких використана космічна та наземна інформація. На третьому рівні — *показники, що впливають на екологічний стан водної геосистеми*, за якими оцінюється її екологічний стан. Складові кожної із груп показників формують четвертий рівень ієрархії — *параметри, використані для оцінки екологічного стану озера Світязь*. П'ятим рівнем є *сама оцінка екологічного стану озера за період 1988—2009 рр.* Для кожного рівня та за кожною його складовою на основі експертних оцінок були побудовані відповідні матриці попарних порівнянь. У результаті обробки матриць визначалися вектори пріоритетів для кожного рівня, компоненти яких визначають їхні пріоритети з погляду експерта. На основі значень відповідних векторів за допомогою рівняння (3) отримано нормовані чисельні оцінки екологічного стану (ОЕ) озера Світязь за період 1988—2009 рр. (таблиця).

Для виявлення зв'язку екологічного стану водойми із критерієм  $F$  оцінено коефіцієнт кореляції  $r$  між значеннями критерію  $F$  та експертними оцінками екологічного стану озера за цей же період. Результати обчислень показали, що функція відповідності  $F$  характеризує екологічний стан озера Світязь з ймовірністю 0.8, яка цілком прийнятна для практичного використання оперативного дистанційного контролю екологічного стану водойми. Отримана кореляційна залежність була перевірена на статистичну значимість. Для цього з використанням функції  $U$  [4] перевірялась гіпотеза про рівність нулеві одержаних коефіцієнтів кореляції  $r$  для  $n$  експериментів:

$$U = \frac{\sqrt{n-3}}{2} \cdot \ln \frac{1+r}{1-r}. \quad (6)$$

Відсутність статистично достовірної кореляційної залежності виявляється у випадку, коли значення функції  $U$  потрапляють в інтервал  $-Z_{\alpha/2} \leq U < Z_{\alpha/2}$ , де  $Z_{\alpha/2}$  — обмеження по площі

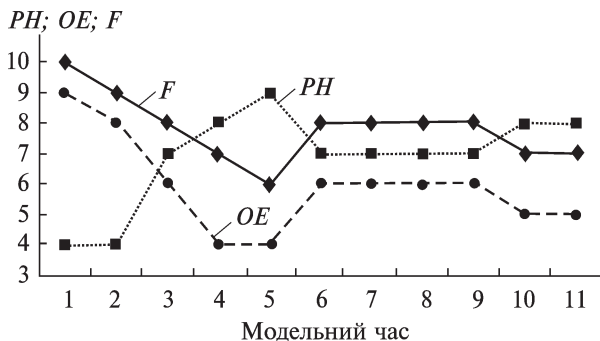


Рис. 3. Модельні значення показників рекреаційного навантаження (PH), екологічного стану водойми (OE) та функції відповідності  $F$

гауссівського розподілу за ординатами  $\pm\alpha$ . Значення  $U$  для 11 років дорівнює 3.1.

Межі зони  $\pm Z_{\alpha/2}$  для функції  $U$  обрано при значеннях  $\alpha = 0.1$ , що відповідає достовірності 0.8:  $\pm Z_{\alpha/2} = \pm 1.65$ . Таким чином, наявність статистично достовірної кореляційної залежності підтверджено.

Моделювання та прогноз впливу рекреаційного навантаження  $PH$  (див. таблицю) на можливі екологічні наслідки було виконано на основі розробленої концептуальної моделі і рівнянь (5). При цьому були використані статистичні (архівні) дані  $PH$  [3].

На рис. 3 представлені результати моделювання у вигляді графіка залежності  $OE$  і  $F$  від  $PH$ . Результати прогнозу ймовірних екологічних наслідків на основі системного моделювання підтверджують можливість побудови динамічних моделей природного середовища для прогнозування впливу розвитку рекреаційного навантаження на екологічний стан водойми і його оцінки на основі критерію  $F$ .

## ВИСНОВКИ

1. На прикладі дослідження озера Світязь обґрунтовано використання інформації космічного геомоніторингу для оцінки екологічного стану водойми шляхом виявлення зв'язку експертних оцінок стану водойми з показником, який характеризує параметри ПТК (клас і площа), що надійно дешифруються на космічних знімках.

2. Показано, що функція відповідності  $F$  характеризує екологічний стан з ймовірністю 0.8, чого цілком достатньо для оперативного дистанційного контролю екологічного стану водойми.

3. Моделювання рекреаційного впливу на екосистему озера Світязь визначило, що сформована модель адекватно реагує на збільшення обсягу навантаження, яке призводить до відповідних змін площ, зайнятих ПТК. Уточнюючи функції впливу моделі, можна обґрунтувати такий сценарій побудови рекреаційних зон, при якому рекреаційне навантаження буде підтримуватися на рівні спроможності природних ресурсів і задовольняти розвиток туризму. Крім того, значення показника  $F$  адекватно реагують на зміни значень ОЕ, що підтверджує можливість його використання в якості критерію оцінки екологічного стану водойми.

Таким чином, запропоновані підходи дозволять у подальшому не лише здійснювати екологічний моніторинг на новому рівні, але й на науковому підґрунті розробляти екологічно збалансовані менеджмент-плани управління використанням рекреаційного потенціалу водойм, подібних озеру Світязь.

1. Гейны С., Дубына Д. В., Сытник К. М. и др. Макрофиты — индикаторы изменений природной среды. — К.: Наук. думка, 1993. — 433 с.
2. Карпова Г. А., Зуб Л. Н. Современное состояние макрофитов оз. Свитязь (Шацкие озера, Украина) в условиях нарастающей рекреационной нагрузки // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды: Матер. міжнар. науч. конф. — Минск: Нарыч, 2003. — С. 270—273.
3. Карпова Г. О., Зуб Л. М. Негативна трансформація макрофітної рослинності озера Світязь в умовах посилення рекреаційного навантаження // Озера та штучні водойми України: сучасний стан й антропогенні зміни: Матер. Першої міжнар. наук.-практ. конф. — Луцьк: Вежа, 2008. — С. 312—316.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1974. — 831 с.
5. Лялько В. И., К. Маринич О. М., Федоровський О. Д. Аерокосмічні дослідження ландшафтних комплексів України // Укр. географічний журн. — 1994. — № 4. — С. 3—8.
6. Окснюк О. П., Якушин В. М., Тимченко В. М. Трофосапробиологическая характеристика Шацких озер // Гидробиол. журн. — 1997. — 33, № 1. — С. 24—35.
7. Підгородецька Л. В., Зуб Л. М., Федоровський О. Д. Оцінка динаміки заростання макрофітами водойм на основі космічної інформації ДЗЗ і наземних спостережень (на прикладі озера Світязь) // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA: Матер. доп. 2-ї Всеукр. конф. з запрошенням закордонних учасників. — Київ: Освіта України, 2010. — С. 110—111.
8. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1993. — 186 с.
9. Тимченко В. М., Окснюк О. П. Управление водными экосистемами как перспективное направление экологической гидрологии // Гидробиол. журн. — 1998. — 34, № 6. — С. 120—128.
10. Тимченко И. Е. Игумнова Е. М. Прогнозирование природных процессов методом адаптивного баланса влияний // Мор. гидрофиз. журн. — 2004. — № 5. — С. 53—63
11. Федоровський А. Д., Даргейко Л. Ф., Зубко В. П., Якимчук В. Г. Системный подход к оценке эффективности аппаратных комплексов дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. — 2001. — 7, № 5-6. — С. 75—79.
12. Федоровський А. Д., Сиренко Л. А., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г. Методические аспекты дешифрирования космических изображений водных растительных ландшафтов для оценки экологического состояния устьевых участков рек // Гидробиол. журн. — 2000. — 36, № 2. — С. 84—94.
13. Forrester J. W. Industrial Dynamics. — Cambridge MA, Productivity Press, 1961. — 391 p.

Надійшла до редакції 30.06.10

L. V. Podgorodetskaia, L. N. Zub, A. D. Fedorovskii

#### THE USE OF REMOTE SENSING DATA FOR ESTIMATION OF ECOLOGICAL STATE OF WATER BODIES BY THE EXAMPLE OF THE SVITYAZ LAKE

We consider the estimation of the ecological state of the Svityaz Lake using remote sensing data. The areas of four types of water vegetation landscapes for assessment of the Svityaz Lake ecological state were classified. We discuss the problem of the impact of water vegetation landscapes areas changes on the Svityaz Lake ecological state. The regression model of ecological state dependence from recreation load on the lake is established. The correlation between the computing simulation and estimated ecological state equals 80 %.