

DOI: 10.36023/ujrs.2020.27.174

УДК 504.064.2:528.88.04

## Спосіб оцінки екологічного стану прісноводних водойм на основі космічного геомоніторингу та статистичного критерію з віртуальними еталонами (обґрунтування та апробація)

О. Д. Федоровський<sup>1</sup>, А. В. Хижняк<sup>1\*</sup>, О. В. Томченко<sup>1</sup>, А. Ю. Порушкевич<sup>1</sup>, Л. В. Підгородецька<sup>2</sup><sup>1</sup> ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. О. Гончара 55 Б, Київ 01054, Україна<sup>2</sup> Інститут космічних досліджень НАН України, просп. Академіка Глушкова, 40, корп. 4/1, Київ 187, ГСП 03680

Обґрунтовано спосіб оцінки екологічного стану прісноводних водойм на основі космічного геомоніторингу і статистичного критерію одночасно по кількох віртуальних еталонах, кожний з яких представляє відповідний рівень техногенного або антропогенного навантаження. Для цього по кожному досліджуваному об’єкту (водоймі) обчислюють ймовірності відношення їх інформативних ознак до інформативних ознак кожного еталона. Отримано кількісну оцінку навантаження, яку наведено у відносних одиницях або балах. Наведено приклади апробації даного методу для дослідження зміни екологічного стану водойм на прикладі Київського водосховища та озера Світязь.

Визначено відповідність отриманих результатів щодо реальних рекреаційних навантажень і оцінкам багатокритеріальної оптимізації (БКО) та аналізу ієрархій (МАІ). Для цього було підраховано коефіцієнт кореляції між отриманим результатом і рекреаційним навантаженням, а також результатами оцінок на основі БКО і МАІ за відповідні роки, який в середньому дорівнював 0.8, що цілком прийнятно для практичних оцінок результатів навантаження на екосистему водойм. Об’єкти досліджень являють собою складні системи, аналіз яких відбувається на різних рівнях абстрактного опису з урахуванням взаємозв’язку їх складових: ландшафтних комплексів (ПТК чи біотопів), гідрологічних, гідробіологічних та гідрохімічних характеристик. Рекреаційне навантаження на озеро Світязь постійно зростає і негативно впливає на його екологічний стан; заростання акваторії верхів’я Київського водосховища вищою водною рослинністю наразі також збільшується, що послаблює ефективність водосховища для потреб водокористування.

**Ключові слова:** ДЗЗ — дистанційне зондування Землі, геомоніторинг, ПТК — природні територіальні комплекси, водна рослинність, якість води, водоспоживання, водокористування

© О. Д. Федоровський, А. В. Хижняк, Л. В. Підгородецька, О. В. Томченко, А. Ю. Порушкевич. 2020

### 1. Вступ

В даний час існує безліч методів оцінки екологічного стану водних об’єктів, однак більшість з них не мають достатньої ефективності при одночасній оперативності та економічності. Використання для цього дистанційної космічної зйомки, з урахуванням таких характеристик, як масштабність, оперативність і повторюваність є найбільш перспективним і економічним рішенням. Наявність високоточної інформації із супутників з географічною прив’язкою з застосуванням ГІС-технологій створює основу для її широкого використання в цілях геомоніторингу стану довкілля. Оперативність і можливість одержання різночасових матеріалів зйомки обумовили доцільність застосування даних космічної зйомки при формуванні геоінформаційних баз даних, які є складовою частиною сучасних систем природно-антропогенного геомоніторингу локального, регіонального та глобального рівнів.

Для забезпечення реалізації цих робіт на принципах системного підходу, міждисциплінарності і структуризації складних про-

блем необхідно створення відповідних методичних основ, а саме розробка методичних засобів, методів і способів.

Мета даної статті — обґрунтувати запропонований спосіб оцінки стану прісноводних водойм на основі космічного геомоніторингу і статистичного критерію шляхом формування віртуальних еталонів навантаження і визначення відповідності отриманих результатів реальним рекреаційним навантаженням і оцінкам методами БКО і МАІ.

Водні об’єкти представляють собою складні системи, аналіз яких відбувається на різних рівнях абстрактного опису з урахуванням ієрархії їх складових: ландшафтних комплексів, гідрологічних, гідробіологічних та гідрохімічних характеристик. При цьому оцінка екологічного стану водойм відбувається на основі статистичного критерію, фактично інтегруючого результати досліджень, отриманих з різних джерел даних.

Виходячи з аналізу попередніх досліджень значний внесок у розвиток методів обробки і тематичної інтерпретації космічних знімків для оцінки якості поверхневих вод зробили такі вчені, як О. С. Бутенко, С. І. Березіна, Л. А. Сіренко, Г. Я. Красовський та ін. Видані чисельні наукові монографії, в яких висвітлено можливості застосування ГІС/ДЗЗ-технологій для здійснення моніторингу водних об’єктів, зокрема Г. Я. Красовського., Ф. Т. Шумакова, В. І. Вишневецького,

\* E-mail: [AVSokolovska@gmail.com](mailto:AVSokolovska@gmail.com)<https://orcid.org/0000-0002-8637-3822>

С. А. Шевчука (Вишневецький, Шевчук, 2018). У цілому, характеризуючи результати виконаних досліджень, потрібно зазначити, що досі немає однозначної відповіді на питання щодо того, які водойми мають кращий екологічний стан, а які гірший.

## 2. Методика досліджень

Спосіб, що пропонується, створюється виходячи з актуальності геомоніторингу екологічного стану водойм при кількісному оцінюванні впливу техногенного або антропогенного навантаження та природної сукцесії по їх відображенню на аерокосмічних знімках і наземним спостереженням одночасно по кільком еталонам, кожний з яких представляє відповідний рівень навантаження. Для цього по кожному досліджуваному об'єкту ( водойми в цілому чи окремої ділянки) обчислюють ймовірності відношення їх інформативних ознак до інформативних ознак кожного еталона. Кількість рівнів еталонів визначається експертом в залежності від завдання.

З метою підвищення точності формуються віртуальні еталони (Остапів та ін., 2016) на основі відповідних інформативних ознак досліджуваних об'єктів. Так еталон максимального рівня навантаження складається з максимальних значень показників техногенного або антропогенного навантаження та природної сукцесії досліджуваних об'єктів; еталон мінімального рівня навантаження складається з мінімальних значень. Відповідно складають еталони проміжних значень навантаження.

Значення ймовірності, які отримані для кожного об'єкту по кожному еталону обчислюються на програмному комплексі,

—  $L_{q,k} = \frac{1}{N_q} \cdot \sum_{n=1}^{N_q} L_{q,k,n}$  — середнє значення інформативних ознак;

—  $\sigma_{q,k} = \left[ \frac{1}{N_q} \cdot \sum_{n=1}^{N_q} (L_{q,k,n} - L_{q,k})^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$  — середнє значення дисперсії.

### 2.1. Вихідні дані:

$Q$  — кількість класів об'єктів, що підлягають розпізнаванню;  
 $q$  — поточний номер (індекс) конкретного класу об'єктів;  
 $K$  — кількість інформативних ознак, що використовуються;  
 $k$  — поточний номер конкретної інформативної ознаки;  
 $L$  — результат конкретного вимірювання інформативної ознаки (вектор розмірності  $K$  з координатами  $L_1, \dots, L_k$ );  
 $N_q$  — об'єм вибірки для випадкової величини  $L_{q,k}$ ;  
 $n$  — поточне значення;

Сукупність операцій, що реалізують запропонований спосіб оцінки навантаження на досліджувану водойму та послідовність їх виконання показана на Рис. 1:

- 1) збір та обробка даних ДЗЗ, наземних спостережень та експертних даних;
- 2) регуляризація даних;
- 3) формування віртуальних еталонних об'єктів;
- 4) створення ГІС-проекту;
- 5) створення матриць інформативних ознак досліджуваних об'єктів по роках;
- 6) визначення віртуальних еталонів і їх вагових коефіцієнтів.

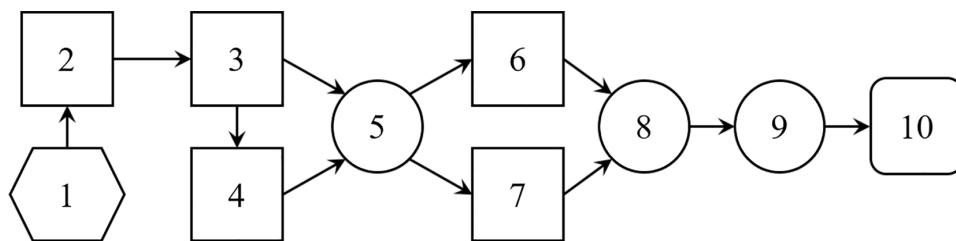


Рис. 1. Алгоритм оцінки техногенного або рекреаційного навантаження на екологічний стан водойм

створеному на основі статистичного (евристичного) критерію, що передбачає апіорне введення інформативних ознак всіх еталонів і автоматичне обчислювання ймовірностей по кожному досліджуваному об'єкту з урахуванням відповідних вагових коефіцієнтів до всіх присутніх еталонів. У результаті чого ми отримуємо кількісну оцінку навантаження, яка представляється у відносних одиницях або балах.

Методичні основи статистичного критерію, що реалізує запропонований спосіб з формуванням віртуальних еталонів за ступенями техногенного або антропогенного навантаження мають вигляд (Arkhipov et al., 2018):

$$C_q = \frac{p_q(\bar{X})}{\sum_{q=1}^Q p_q(\bar{X})} \quad (1)$$

де:  $p_q(\bar{X}) = \left( \frac{1}{2\pi} \right)^{\frac{K}{2}} \prod_{k=1}^K e^{-\frac{(l_k - L_{q,k})^2}{2 \cdot \sigma_{q,k}^2}} \cdot \frac{1}{\sigma_{q,k}}$  — багатомірна щільність розподілу;

- 7) створення матриць ознак віртуальних еталонів;
- 8) обчислення значень ймовірностей в прикладній програмі;
- 9) визначення екологічного стану у відносних одиницях;
- 10) обчислення коефіцієнту кореляції між отриманою оцінкою екологічного стану об'єкта і відповідного навантаження.

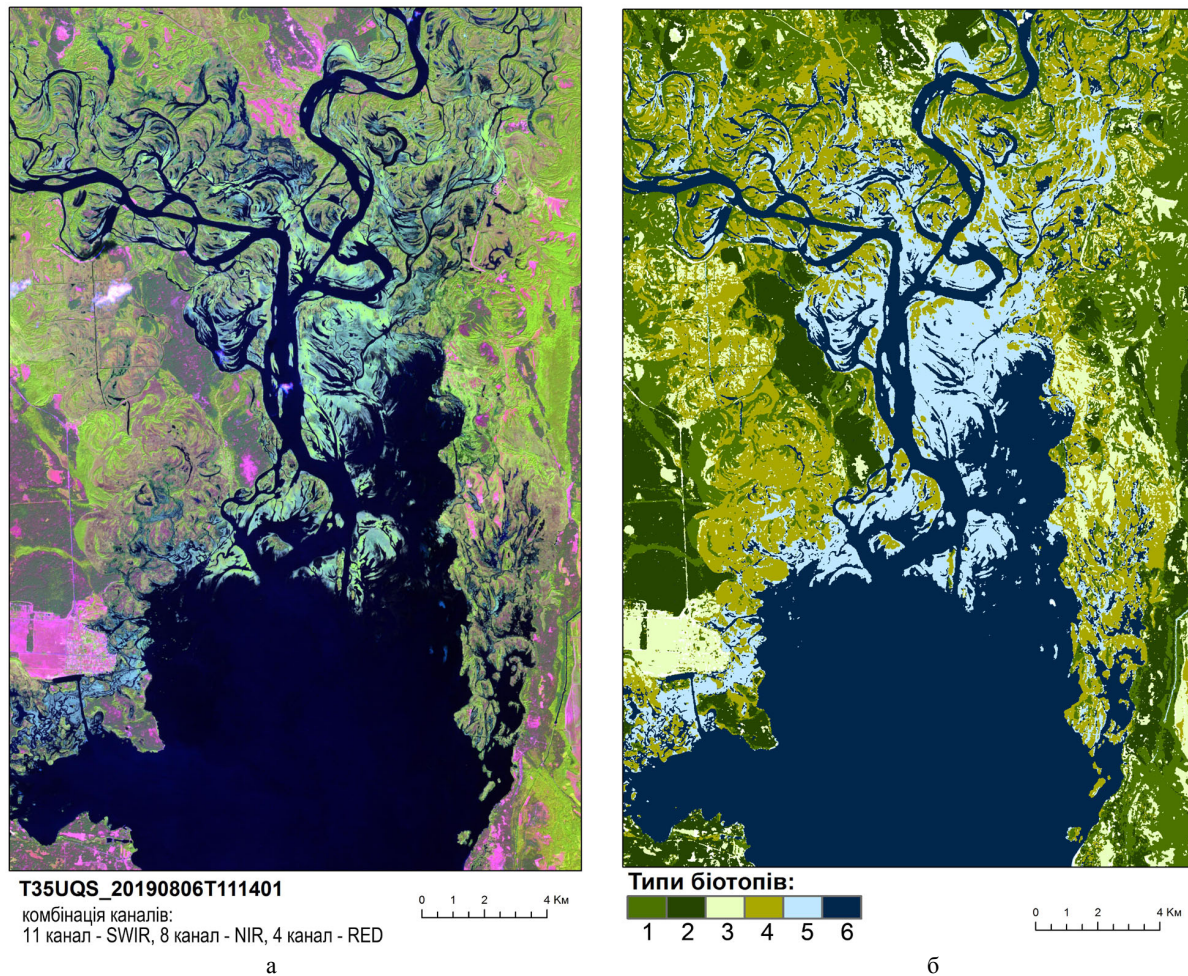
Як відомо оцінка стану екосистеми прісноводних водойм здійснюється за трьома основними екологічними складовими: абіотичний фактор, в тому числі температурний та гідрологічний режими водного середовища; антропогенний фактор, пов'язаний з водогосподарчим або рекреаційним навантаженням і біотичний фактор, який відображає структурно-функціональну організацію угруповань гідробіонтів і динаміку водних біоценозів (Шитиков та ін., 2003).

Частина мілководних ділянок водойм, що заростають, є основою специфічних ландшафтних комплексів, пов'язаних однотипними умовами місцеперебування, які поєднуються в певні типи біотопів і відносяться до числа важливих інформа-

тивних зон водних екосистем. Такими зонами, наприклад, можуть бути: прибережні ділянки та гирла річок, мілководдя водосховищ та інших крупних водних об'єктів (озер, заплавних водойм та інших водно-болотних угідь), які з одного боку, першими реагують на антропогенне забруднення і відносяться до числа найбільш критичних з погляду можливості погіршення екологічної і санітарно-епідеміологічної ситуації в регіоні, а з іншого — є потужним біологічним фільтром, діяльність якого визначає якість води у водоймі, тому контроль за їхнім станом дозволяє не тільки оцінювати екологічну ситуацію, але і прогнозувати її розвиток. Також доведено що

верхів'я Київського водосховища за період з 1985 по 2019 роки через кожні 2 роки (Рис. 2, Таблиця 1).

В результаті розпізнавання космічних знімків Landsat 5, 7, 8 та Sentinel-2 методом штучних нейронних мереж були побудовані карти розподілу та площі основних типів біотопів, а саме: біотопи заплавних листяних лісів, штучних хвойних насаджень, заплавних луків, прибережні перезволожені біотопи з домінуванням високотравних гелофітів, біотопи фіталі, незарослі гідротопи водосховища (глибоководні акваторії річкових русел і водосховища з глибинами понад 2.5 м,



**Рис. 2.** Космічний знімок Sentinel-2 станом на 06 серпня 2019 року (а). Типи біотопів, які виділені на основі космічного знімку (б): 1 — заплавні листяні ліси; 2 — хвойні ліси; 3 — заплавні луки; 4 — перезволожені біотопи; 5 — біотопи фіталі; 6 — незарослі гідротопи

різні типи біотопів мають різнонаправлений вплив на стан водної екосистеми.

Наведений спосіб оцінки стану прісноводних водойм було апробовано на двох прикладах: Київському водосховищі та озері Світязь.

### 3. Результати досліджень

На першому прикладі, була виконана оцінка умов водопостачання у верхів'ї Київського водосховища. Для цього був використаний набір показників водокористування — інформативні ознаки типів біотопів, які були отримані О. В. Томченко за допомогою космічних знімків ДЗЗ (Томченко, 2015)

здебільшого позбавлені заростей вищих водних рослин).

При визначенні впливу біотопів на водокористування за основу взято твердження що зростання площ прибережних біотопів високотравних повітряно-водних рослин болотного типу (перезвожених біотопів) та гідротопи з угрупованнями рослин з плаваючими листками та вільноплаваючих на поверхні води макрофітів (біотопи фіталі) — є показником посилення процесів заболочення, сукцесії та антропогенної евтрофікації, що негативно впливає на водокористування (Федоровський та ін., 2015; Федоровський та ін. 2018).

На основі даних (Таблиця 1) було сформовано три еталона різного рівня навантаження у 3, 6 і 9 балів (Таблиця 2).



**Таблиця 1.**

Результати обчислення площ (км<sup>2</sup>) основних типів біотопів за матеріалами ДЗЗ і результати оцінки екологічного стану верхів'я Київського водосховища на основі запропонованого способу методом статистичного критерію і віртуальних еталонів (Таблиця 2)

№	Роки / Показники	Листяні ліси та чагарники	Хвойні насад- ження.	Заплавні луки.	Прибережні перезволожен і біотопи.	Біотопи фіталі	Незрослі гідротопи.	Результати оцінки за 9-бальною шкалою
1	1985	76.7	38.0	70.5	82.1	45.2	291.4	3
2	1987	80.3	41.4	63.5	82.5	52.3	281.4	3
3	1989	79.2	39.9	71.5	85.4	55.9	270.9	3
4	1991	81.5	40.4	70.3	88.2	74.9	248.1	6
5	1993	73.0	42.4	71.2	90.1	76.7	250.2	3
6	1995	75.0	44.5	73.0	94.9	78.5	237.5	6
7	1997	70.3	42.5	79.4	89.6	62.2	258.6	3
8	1999	79.9	46.3	67.8	103.5	89.9	215.7	6
9	2001	81.0	46.0	65.0	113.7	88.1	209.0	6
10	2003	71.7	46.1	54.7	126.4	98.3	206.0	6
11	2005	77.6	45.7	42.3	134.3	95.4	207.5	6
12	2007	87.5	45.9	42.1	132.2	87.6	207.9	6
13	2009	73.7	45.6	52.8	128.6	90.1	212.5	6
14	2011	82.2	45.3	44.0	137.2	98.7	196.1	9
15	2013	90.2	45.8	37.1	140.1	103.5	187.2	9
16	2015	92.5	46.6	42.6	142.0	104.3	175.8	9
17	2017	85.1	48.1	39.8	145.6	113.7	171.0	9
18	2019	87.8	47.6	37.1	147.3	121.2	162.3	9

Отримані результати (див. Таблицю 1) було порівняно з отриманими раніше результатами оцінки стану ПТК методами БКО і МАІ (Таблиця 3). Коефіцієнт кореляції дорівнював — 0.77 і 0.82, що свідчить про працездатність запропонованого способу.

На другому прикладі була виконана аналогічна апробація запропонованого способу на дослідженні зміни екологічного стану озера Світязь пов'язаного безпосередньо з рекреаційним навантаженням за найбільш характерні роки з 1988 по 2018 рр.

На Рис. 3 представлено космічний знімок озера Світязь Sentinel 2A 09.09.2019 р., а на Рис. 4 — відповідну карту

розподілу природно-територіальних комплексів (ПТК) озера Світязь.

Для того, щоб простежити динаміку екологічних змін водних об'єктів, необхідно мати набір показників стану водойми, певні з яких можна отримати за допомогою космічних знімків ДЗЗ. Виходячи з мети були сформовані інформативні ознаки — площі ПТК та концентрації гідрохімічних показників водного середовища озера Світязь, що найбільш відображають рекреаційний процес по рокам з 1988 по 2018 р. (Таблиця 4). Останнім часом, завдяки своїй туристичній привабливості, озеро страждає від значного антропогенного впливу. Постійно зростає рекреаційне навантаження

**Таблиця 2.**

Показники еталонів для оцінки екологічного стану верхів'я Київського водосховища на основі статистичного критерію

№ еталонів / показники	1 еталон (3 бала)	2 еталон (6 балів)	3 еталон (9 балів)
Листяні ліси	73; 75	80; 82	92; 94
Хвойні ліси	40; 42	44; 5	46; 47
Заплавні луки	85; 90	113; 126	137; 142
Перезволожені біотопи.	55; 62	74; 95	103; 104
Біотопи фіталі	0.9; 1.2	1.4; 1.6	2.0; 3.2
Незрослі гідротопи	281; 291	215; 250	175; 196

**Таблиця 3.**

Результати обчислень на основі статистичного критерію і значення узагальненого критерію F оцінки вод верхів'я Київського водосховища для потреб водоспоживання (методом БКО) і водопостачання (МАІ) за період з 1989 до 2013 рр.

Роки	1989	1991	1993	1995	1997	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	2013
$C_q$	3	6	3	6	3	6	6	6	6	6	6	9	9
БКО	1.00	0.98	0.97	0.94	0.96	0.87	0.84	0.81	0.764	0.83	0.83	0.81	0.73
МАІ	0.23	—	0.18	—	0.15	—	0.12	—	—	0.1	—	—	0.08



Рис. 3. Космічний знімок Sentinel 2A 09.09.2019 р.

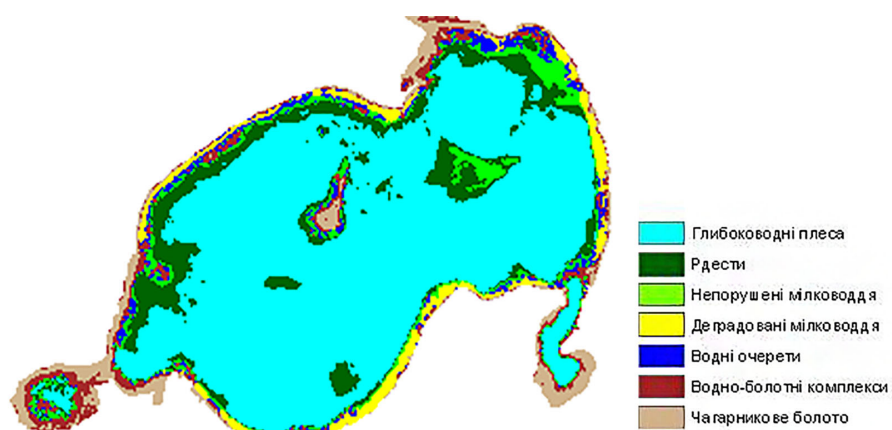


Рис. 4. Карта розподілу ПТК оз. Світязь станом на 23.08.2018 р.

Таблиця 4.\*

Показники стану озера Світязь по роках

№	Роки / Типи показників	1988	1989	1992	1994	1999	2001	2003	2006	2007	2008	2014	2018
1	Деградовані прибережні мілководдя $P_j/P$	0.06	0.04	0.09	0.12	0.08	0.09	0.13	0.09	0.12	0.08	0.15	0.11
2	Водно-болотні комплекси $P_j/P$	0.11	0.07	0.09	0.07	0.12	0.09	0.07	0.15	0.17	0.08	0.19	0.14
3	Непорушені мілководдя $P_j/P$	0.18	0.21	0.24	0.16	0.17	0.12	0.14	0.13	0.14	0.16	0.10	0.14
4	Мінералізація, $мг/дм^3$	188.0	183.0	188.0	199.0	430.0	240.0	130.0	140.0	150.0	148.0	229.0	147.8
5	Хлориди, $мг/дм^3$	15.0	13.0	19.0	24.0	140.3	15.1	17.8	16.2	15.8	15.8	11.9	18.63
6	Азот амонійний ( $NH_4^+$ ), $мг N/дм^3$	0.40	0.12	0.20	0.35	1.20	0.20	0.40	0.40	0.30	0.30	0.09	0.21
7	Азот нітратний ( $NO_3^-$ ), $мг N/дм^3$	0.01	0.015	0.01	0.01	0.03	0.01	0.08	0.05	0.09	0.07	0.18	0.012
8	Фосфати ( $PO_4^{3-}$ ), $мг P/дм^3$	0.01	0.02	0.02	0.03	0.06	0.06	0.05	0.02	0.04	0.04	0.011	0.04

\* Відносні значимості:  $p_j = N_j / N$ ;  $j = \overline{1, m}$ ;  $\sum_{j=1}^m p_j = 1$ ;

призводить до зниження стійкості озерної екосистеми. Виявлено, що безпосередній механічний вплив, викликаний відпочивальниками, веде до знищення водно-рослинних угруповань, втрати алювіально-залежних видів макрофітів та до деградації заростей макрофітів, що відповідно порушує екологічну рівновагу водойми. Для вибірки розміром  $N$ , що містить  $N_j$  пікселів ПТК  $j$ -того типу визначається відносна значимість ПТК  $j$ -того типу у вибірці.

Показники ПТК Світязь за 2014 та 2018 роки були отримані із застосуванням методики експертної класифікації, що вже використовувалася для обробки супутникових знімків Landsat при оцінюванні екологічного стану озера за попередній період (Підгородецька та ін., 2010; Томченко та ін., 2013). Середньорічні концентрації гідрохімічних показників водного середовища озера взято з Екологічних паспортів Волинської області за відповідні роки (Екологічний паспорт..., 2015; Екологічний паспорт..., 2019).

Для оцінки змін екологічного стану озера Світязь було вибрано еталони трьох рівнів навантаження. В Таблиці 5 приведено результат формування показників еталонів з відповідних інформативних ознак ПТК і середовища озера Світязь в двох варіантах кожний (вимога програми). При цьому еталон 1 складався з показників, відповідних найменшим навантаженням, еталон 2 — з середніх значень і еталон 3 — з максимальних значень показників навантаження.

По кожному досліджуваному року було обчислено ймовірності відношення інформативних ознак озера Світязь за цей рік до інформативних ознак кожного еталона. У результаті отримано кількісну оцінку рекреаційного навантаження на озера Світязь, яка представляється по трьом рівням навантаження трьох видів еталонів з урахуванням вагових коефіцієнтів у балах: 3, 6 і 9 по кожному року.

У Таблиці 5 приведено результат формування показників еталонів з відповідних інформативних ознак ПТК і середовища озера Світязь за трьома рівнями рекреаційного навантаження: еталон 1 — складається з найменших значень навантаження (3 бали), еталон 3 — з максимальних значень навантаження (9 балів), 2 — складається з проміжних значень рекреаційного навантаження. (6 балів).

Таблиця 6 засвідчує значення рекреаційного навантаження (тис. чол.) і результати оцінки його впливу на середовище озера Світязь, які отримані на основі статистичного критерію у балах за трьома рівнями навантаження.

В порядку обґрунтування запропонованого способу було визначено відповідність отриманих результатів реальним рекреаційним навантаженням. Для цього було підраховано коефіцієнт кореляції між рекреаційним навантаженням за відомі роки (1988–2014) і результатами оцінки його впливу на основі статистичного критерію. В результаті обчислень коефіцієнт кореляції дорівнює 0.82, що цілком прийнятно для практичних оцінок. Таким чином, використання статистичного критерію за набором інформативних ознак ПТК на основі супутникових даних та гідрохімічних показників водного середовища озера Світязь дозволяє опосередковано оцінювати ступінь рекреаційного навантаження на екосистему озера.

#### 4. Висновки

1. Запропоновано спосіб оцінки екологічного стану прісноводних водойм на основі космічного геомоніторингу і статистичного критерію шляхом формування віртуальних еталонів навантаження, кожний з яких представляє відповідний рівень суцесійного розвитку, техногенного або антропогенного навантаження.
2. Для обґрунтування запропонованого способу було визначено відповідність отриманих результатів реальним рекреаційним навантаженням і оцінкам методами БКО і МАІ. Для цього було підраховано коефіцієнт кореляції між отриманим результатом і рекреаційним навантаженням, а також результатами оцінок на основі БКО і МАІ за відповідні роки, який в середньому дорівнював 0.8, що цілком прийнятно для практичних оцінок результатів навантаження на екосистему водойм.
3. Для дешифрування космічних знімків використані віртуальні еталони навантаження, які створені на основі чисельних значень показників досліджуваних водойм, що значно удосконалює процедуру вибору еталонів, підвищуючи точність і об'єктивність вимірювань.

Таблиця 5.

Віртуальні еталони показників озера Світязь

№	№ еталонів / Показники	1 еталон коэф. навант. 3	2 еталон коэф. навант. 6	3 еталон коэф. навант. 9
1	Деградовані прибережні / мілководдя $P_j$	0.06; 0.07	0.08; 0.09	0.12; 0.13
2	Водно-болотні комплекси $P_j$	0.07; 0.11	0.11; 0.12	0.15; 0.17
3	Непорушені мілководдя $P_j$	0.18; 0.24	0.16; 0.17	0.12; 0.11
4	Мінералізація $мг/дм^3$	140; 180	200; 240	240; 430
5	Хлориди $мг/дм^3$	13; 15	17.0; 17.8	19; 24
6	Азот амонійний ( $NH_4^+$ ) $мгN/дм^3$	0.12; 0.35	0.40; 0.50	1.0; 1.2
7	Азот нітратний ( $NO_3^-$ ) $мг N/дм^3$	0.01; 0.03	0.03; 0.05	0.08; 0.09
8	Фосфати ( $PO_4^{3-}$ ) $мгP/дм^3$	0.01; 0.02	0.03; 0.04	0.06; 0.07

Таблиця 6.

Рекреаційне навантаження (тис. чол.) і результати оцінки його впливу на середовище озера Світязь (у відносних одиницях)

Роки	1988	1989	1992	1994	1999	2001	2003	2006	2007	2009	2014
Навантаження	48	48	52	56	72	67	59	68	75	70	80
Результат	3	3	3	3	9	6	9	6	9	6	9

4. Оцінка екологічного стану верхів'я Київського водосховища та озера Світязь з комплексним використанням космічної й наземної інформації дає змогу також отримувати загальну картину заростання водних об'єктів і відстежувати зміни площ основних типів рослинних угруповань за тривалий період.
5. Пропонований спосіб оцінювання стану водних екосистем на основі статистичного критерію і віртуальних еталонів, набутий, у ході їхньої апробації на реальних об'єктах, досвід дали можливість поповнити методичну базу дистанційних аерокосмічних досліджень у природокористуванні і використовувати як методичні засоби для оцінювання стану прісноводних водоемів України.

## Література

- Вишневський В. І., Шевчук С. А. Використання даних дистанційного зондування Землі у дослідженнях водних об'єктів України. Київ: Інтерпрес ЛТД, 2018. 114 с.
- Екологічний паспорт. Волинська область. 2014 р. Міністерство екології та природних ресурсів України. 2015. URL: <http://www.menr.gov.ua/index.php/protection/protection1/volynska>.
- Екологічний паспорт. Волинська область. 2018 р. Волинська обласна державна адміністрація. 2019. URL: <https://voladm.gov.ua/category/ekologichni-pasporti/1/>.
- Підгородецька Л. В., Зуб Л. М., Федоровський О. Д. Використання інформації космічного геомоніторингу для оцінки екологічного стану водоемів на прикладі озера Світязь. *Космічна наука і технологія*. 2010. Т. 16. № 4. С. 51–56.
- Томченко О. В., Підгородецька Л. В., Федоровський О. Д. Комплексна оцінка екологічного стану водоемів на основі космічної інформації дистанційного зондування Землі (на прикладі оз. Світязь та верхів'я Київського водосховища). *Гідроакустичний журнал*. 2013. № 10. С. 111–117. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/gaj\\_2013\\_10\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/gaj_2013_10_16).
- Томченко О. В. Обґрунтування методів системного аналізу стану водно-болотних угідь з використанням даних дистанційного зондування Землі і наземних спостережень (на прикладі верхів'я Київського водосховища): автореф. дис. ... канд. техніч. наук: 05.07.12. Київ, 2015. 22 с.
- Федоровський О. Д., Хижняк А. В., Томченко О. В., Зуб Л. М., Підгородецька Л. В., Дяченко Т. М., Шевченко А. М., Власова О. В., Ходоровський А. Я. Мультидисциплінарний аналіз аерокосмічної і наземної інформації при оцінці стану водних екосистем на основі методів системного аналізу. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2015. № 7. С. 27–42. URL: <http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/61/79>.
- Федоровський О. Д., Зуб Л. М., Томченко О. В., Хижняк А. В., Ходоровський А. Я., Підгородецька Л. В. Оцінка стану водних екосистем на основі методів системного аналізу аерокосмічної і наземної інформації. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2018. № 4 (23). С. 106–111. URL <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/4/25.pdf>.
- Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Остапів В. В., Піндус Н. М., Чеховський С. А., Ключко Н. Б. Віртуальні еталони, як засіб підвищення точності вимірювань. *Системи обробки інформації*. 2016. № 6 (143). С. 108–111. тифікації. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Arkhipov A. I., Glazunov N. M., Khyzhnyak A. V. Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Volume 54. Issue 1. pp. 94–98.

## References

- Arkhipov, A. I., Glazunov, N. M. & Khyzhnyak, A. V. (2018). Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness. *Cybernetics and Systems Analysis*, 54 (1), 94–98. DOI 10.1007/s10559-018-0010-7.
- Ecological passport. Volyn region. 2014. Volyn Regional State Administration. (2015). Retrieved from <http://www.menr.gov.ua/index.php/protection/protection1/volynska>.
- Ecological passport. Volyn region. 2018. Volyn Regional State Administration. (2019). Retrieved from <https://voladm.gov.ua/category/ekologichni-pasporti/1/>.
- Fedorovsky, O. D., Khyzhnyak, A. V., Tomchenko, O. V., Zub, L. M., Podgorodetska, L. V., Dyachenko, T. M., Shevchenko, O. M., Vlasova, E. V., Khodorovsky, A. Ya., & Yakymchuk, V. H. (2015). The multidisciplinary analysis of the aerospace and ground information while assessing the status of water ecosystems based on the methods of system analysis. *Ukrainskyj zhurnal dystancijnogho zonduvannja Zemli*. 7, 27–42. Retrieved from <http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/61/79>. (in Ukrainian).
- Fedorovsky, O. D., Khyzhnyak, A. V., Zub, L. M., Tomchenko, O. V., Khodorovsky, A. Ya. & Podgorodetska, L. V. (2018). Assessment of the state of aquatic ecosystems based on methods of systematic analysis of aerospace and ground information. *Ekologichni nauky: nauково-praktychnyj zhurnal*, 4 (23), 106–111. Retrieved from <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/4/25.pdf>. (in Ukrainian).
- Ostapiv, V. V., Pindus, N. M., Chekhovskiy, S. A. & Klochko, N. B. (2016). Virtual standards as a means of improving measurement accuracy. *Systemy obrobky informacii*. 6 (143), 108–111. (in Ukrainian).
- Podgorodetska, L. V., Zub, L. N., Fedorovskiy, O. D. (2010). The use of remote sensing data for estimation of ecological state of water bodies by the example of the Svityaz lake. *Kosm. nauka tehnol*, 16 (4), 51–56. Retrieved from <https://doi.org/10.15407/knit2010.04.051>. (in Ukrainian).
- Tomchenko, O. V., Podgorodetska, L. V. & Fedorovsky, O. D. (2013). The complex assessment of the ecological state of water bodies using remotely sensing data (from example Lake Svityaz and upper Kyiv Reservoir). *Gidroakustychnyj zhurnal*, 10, 111–117. Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/gaj\\_2013\\_10\\_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/gaj_2013_10_16). (in Ukrainian).
- Tomchenko O. V. (2015). Substantiation of wetland system analysis methods using remote sensing data and ground observations (in the upper Kyiv reservoir case study) (Extended abstract of candidate thesis). State institution Scientific center for aerospace researches of the Earth of IGS NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine. (in Ukrainian).
- Shitikov, V. K., Rosenberg, G. S., Zinchenko, T. D. (2003). Quantitative hydroecology: methods of system identification. Togliatti: IEVB RAS. (in Russian).
- Vishnevsky, V. I. & Shevchuk, S. A. (2018). Use of remote sensing data of the Earth in studies of water bodies of Ukraine. Kyiv: Interpress LTD. (in Ukrainian).

## СПОСОБ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКОГО ГЕОМОНИТОРИНГА И СТАТИСТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ С ВИРТУАЛЬНЫМИ ЭТАЛОНАМИ (ОБОСНОВАНИЕ И АПРОБАЦИЯ)

А. Д. Федоровский, А. В. Хижняк, О. В. Томченко, А. Ю. Порушкевич, Л. В. Подгородецкая

ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины”, ул. Олеся Гончара 55-Б, Киев, Украина, 01054

В статье обосновывается предложенный способ оценки экологического состояния пресноводных водоемов на основе космического геомониторинга и статистического критерия одновременно по нескольким эталонам, каждый из которых представляет соответствующий уровень техногенного или антропогенной нагрузки. Для этого по каждому изучаемому объекту (водоему) вычисляют вероятности соответствия их информативных



признаков информативным признакам каждого эталона. В результате получают количественную оценку влияния нагрузки в относительных единицах или баллах. Приведены примеры апробации предложенного метода для исследования изменения экологического состояния водоемов на примере Киевского водохранилища и озера Свитязь.

Для обоснования предложенного способа было определено соответствие полученных результатов на основе статистического критерия оценкам реальной рекреационной нагрузки и оценкам влияния нагрузок полученных методами МКО и МАИ. Для этого были подсчитаны коэффициенты корреляции между этими результатами за соответствующие годы, который в среднем был равен 0.8, что вполне приемлемо для практических оценок результатов нагрузки на экосистему водоемов. Установлено, что водные объекты представляют собой сложные системы, анализ которых происходит на разных уровнях абстрактного описания с учетом взаимосвязи их составляющих: ландшафтных комплексов (ПТК или биотопов), гидрологических, гидробиологических и гидрохимических характеристик. В ходе исследования выяснено что рекреационная нагрузка на озеро Свитязь постоянно растет и соответственно негативно влияет на его экологическое состояние. Также выявлено, что зарастание акватории верховья Киевского водохранилища высшей водной растительностью также увеличивается, что в свою очередь ослабляет эффективность водохранилища для нужд водопотребления.

**Ключовые слова:** ДЗЗ— дистанционное зондирование Земли, геомониторинг, ПТК — природно территориальные комплексы, водная растительность, качество воды, водопотребление, водоснабжение

#### METHODS FOR EVALUATING THE ECOLOGICAL CONDITION OF FRESHWATER OBJECTS BASED ON SPACE GEOMONITORING AND STATISTICAL CRITERIA WITH VIRTUAL STANDARDS (RATIONALE AND TESTING)

A. D. Fedorovsky, A. V. Khizhnyak, O. V. Tomchenko, A. Y. Porushkevych, L. V. Pidgorodetska

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine. 55B, O. Gonchar st., Kyiv, Ukraine, 01054

The article substantiates the method of assessing the ecological status of freshwater reservoirs using space geomonitoring and statistical criteria with several standards simultaneously, each of which represents the level of technogenic or anthropogenic load. To achieve this, the probabilities of the affiliation of their informative features to the informative features of each standard are calculated for each studied object (reservoir). The result is a quantitative estimation of the load, which is given in relative units or points. The approbation of the offered method for research of the changes in ecological conditions of reservoirs is done over the Kyiv Reservoir and lake Svityaz.

During the study of the method, the correspondence of the obtained results using the statistical criterion to the real estimates of recreational load made by the method of multi-criteria optimization (MCO) and method of analysis of hierarchies (MAH) was determined. For this purpose, the correlation coefficient between the obtained result and recreational load, as well as the results of assessments based on MCO and MAH for the respective years was calculated, which averaged 0.8, which is quite acceptable for practical assessments of water ecosystem load. It was determined that water bodies are complex systems and their analysis takes place at different levels of abstractions, taking into account the relationship of their components: landscape complexes (LC), hydrological, hydrobiological and hydrochemical characteristics. The study found that the recreational load on Lake Svityaz is constantly increasing and has negative impact on its ecological condition. It was also found that the overgrowing of the upper springhead of the Kyiv Reservoir with higher aquatic vegetation is also currently increasing, which weakens the efficiency of the reservoir for purposes of water consumption.

**Keywords:** RS — remote sensing, geomonitoring, NTC — natural territorial complexes, aquatic vegetation, water quality, water consumption, water supply

*Рукoпис статті отримано 21.08.2020*