

УДК 528.8.04

Системний підхід при оцінці екологічного стану мілководь Київського водосховища на основі даних ДЗЗ

О.В. Томченко

Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”, Київ

*Метою дослідження була оцінка поступових змін, що відбуваються в природних екосистемах з використанням багаторічних космічних знімків КА Landsat 5 ТМ. За допомогою аналізу даних часових рядів були виявлені докази поступової систематичної зміни в багатьох природних рослинних угрупованнях. В роботі був використаний системний метод багатокритеріальної оптимізації. Поєднання ГІС та статистичного аналізу на ділянці мілководдя верхів'я Київського водосховища показали, що зона повітряно-водних макрофітів, в якій домінують очерет звичайний (*Phragmites Australis*), швидко розширюється протягом останніх трьох десятиліть. Підхід, описаний в цій статті демонструє, що архівні дані Landsat можуть бути використані для оперативної оцінки поступових змін екосистеми на великих площах. При цьому матеріали наземних спостережень і додаткові дані необхідні для того, щоб повністю зрозуміти природу цих тенденцій.*

*СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД ПРИ ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕЛКОВОДЬ КИЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДЗЗ, Томченко О.В. — Целью исследования была оценка постепенных изменений, происходящих в естественных экосистемах с использованием многолетних космических съемок КА Landsat 5 ТМ. С помощью анализа данных временных рядов были обнаружены доказательства постепенного систематического изменения во многих природных растительных сообществах. В работе был использован системный метод многокритериальной оптимизации. Сочетание ГИС и статистического анализа на участке мелководья верховья Киевского водохранилища показали, что зона воздушно-водных макрофитов, в которой доминируют тростник обыкновенный (*Phragmites Australis*), быстро расширяется в течение последних трех десятилетий. Подход, описанный в этой статье, показывает, что данные временных рядов Landsat могут быть использованы для оперативной оценки постепенных изменений экосистемы на больших площадях. Наземные знания и доступные дополнительные данные необходимы для того, чтобы полностью понять природу этих тенденций.*

*SYSTEMS APPROACH TO ESTIMATION OF ECOLOGICAL STATE OF SHALLOW WATERS OF THE KIEV RESERVOIR VIA REMOTE SENSING DATA ANALYSIS, by Tomchenko O.V. — The focus of the study was to assess gradual changes occurring throughout a range of natural ecosystems using Landsat 5 Thematic Mapper (TM) time series data. Through analyses of time series data, we found evidence of gradual systematic change in many of the natural vegetation communities. The system method multiobjective optimization was used in the research. The combined GIS and statistical analysis of the shallow waters of upper Kiev reservoir showed that the helophytic macrophyte belt, dominated by common reed (*Phragmites australis*), has rapidly widened during the last three decades. The approach described in this paper demonstrates that Landsat time series data can be used operationally for assessing gradual ecosystem change across large areas. Local knowledge and available ancillary data are required in order to fully understand the nature of these trends.*

Ключевые слова: экосистема; макрофиты; дешифрирование; системные методы; многокритериальная оптимизация.

Key words: ecosystem; macrophytes; decoding; system methods; multicriteria optimization.

Загальновідомо, що антропогенний вплив на водні екосистеми в сучасний період неврегульованих взаємин між людським суспільством і навколишнім природним середовищем спричиняє екологічні негаразди (забруднення промисловими і комунальними стічними водами, погіршення якості води, евтрофікацію, заболочування, пересихання, збіднення видового складу біоти тощо) [1]. Для оцінки і відвернення шкідливого антропогенного впливу на навколишнє природне середовище надзвичайно важливою є система екологічного моніторингу водних екосистем на основі поєднання даних наземних спостережень стану якості води (показники зі створів Держгідромету України) з матеріалами дистанційного зондування Землі на основі ГІС/ДЗЗ-технологій та їх подальший статистичний аналіз за допомогою системних методів.

Мета дослідження — оцінити поступові зміни, що відбуваються в аквальної екосистемі Київського водосховища з використанням багаторічних космічних знімків КА Landsat 5 та змодельовати за допомогою системних методів різні сценарії подальшого розвитку екологічного стану території.

Об'єкт дослідження та передумови: внаслідок гідробудівництва в 1931–1976 рр. вся акваторія Дніпра в межах України перетворилася на каскад водосховищ, що істотно змінило структурно-функціональну організацію річкової екосистеми, на базі якої сформувались нові екосистеми водосховищ озерно-річкового типу.

Київське водосховище є верхнім у каскаді дніпровських водосховищ. Заповнення водою водосховища до проектної відмітки нормального підпертого рівня (НПР) — 103,0 м завершено в 1966 році. Площа водойми при НПР складає 92,2 тис. га в межах Київської і Чернігівської областей. Довжина водойми при НПР — 110 км, максимальна ширина — 12 км, середня глибина — 4 м, максимальна — 14,5 м.

Найбільшу увагу для дослідження привертають до себе мілководдя - ділянки акваторії з глибинами менше 2 м, що є природний біофільтр між основною акваторією водосховищ і прилеглою сушею [4]. Верхів'я Київського водосховища характеризуються значними площами мілководь, оскільки затоплення заплави Дніпра тут було незначним (загалом, 40% площі водосховища займають мілководдя). Глибоководні ділянки приурочені до затоплених русел річок та заплавлених водойм, глибина води у фарватері становить 5–7 м. Верхів'я Київського водосховища є одним із найбільших в Українському Поліссі місць концентрації птахів, багато видів яких охороняються на національному та міжнародному рівнях. Тут знаходяться величезні масиви заростей рослин, які занесені до Додатку I Бернської конвенції (сальвінії плаваючої і водяного горіха плаваючого), що відіграють важливу роль як нерестилища багатьох видів риби. Розвинуті угруповання макрофітів, що занесені до Зеленої книги України.

Через мілководність домінуючим для аквальної частини цих водно-болотних угідь є комплекс водної та прибережно-водної рослинності. Основні масиви заростей розташовані у Дніпровському та Прип'ятському відрогі, Тетерівській затоці, а також на акваторії верхньої частини водосховища, в районі злиття відрогів. Головними ценозоутворювачами є види повітряно-водних рослин.

Матеріали та методи дослідження. В ході роботи були використані знімки середньої роздільної здатності з KA LANDSAT 5 зі сканером TM (Thematic Mapper) в трьох режимах зйомки: VNIR (Visible and Near Infrared — мультиспектральний видимий і ближній інфрачервоний діапазон), SWIR (Shortwave Infrared — середній інфрачервоний діапазон), TIR (thermal infrared — тепловий інфрачервоний діапазон) за період від 1985 р. і до 2011 р. Для більш детального дешифрування та аналізу сучасного стану території мілководь додатково використовувалися знімки високої роздільної здатності QuickBird. При вивченні характеру заростання і розподілу рослинності також були використані топографічні карти та карти глибин водного об'єкту, спираючись на які було проведено його попереднє районування і складена схеми заростання, беручи до уваги, насамперед морфометричні ознаки. Для обробки та інтерпретації даних ДЗЗ були використані програмні пакети ERDAS IMAGINE 2011 (Leyca Geosystem Inc), ArcGis 10 та QGIS.

На першому етапі було відібрано 14 знімків Landsat 5 літнього періоду (червень-липень), коли вегетаційна маса водної рослинності є найбільшою. Наступним кроком було дослідження спектральної яскравості відбиваючих поверхонь різних типів (класів) у залежності від довжини хвилі на синтезованих знімках.

На території верхів'я водосховища було обрано 7 основних класів відбиваючих поверхонь (дерев'янисто-чагарникова рослинність: лісові масиви хвойні (1), лісові масиви листяні + чагарники (2); трав'яниста рослинність: природні луки + сінокоси та пасовища (3); вища водна рослинність: повітряно-водна (4), рослинність з плаваючим на поверхні листям + занурена (5); відкрита водна поверхня (6); піщані масиви (7). У програмі ArcGis був побудований векторний файл еталонів, в якому на кожен виділений клас об'єктів було набрано не менше 10 еталонних ділянок, що максимально охоплювали весь спектральний діапазон кожного класу. Після створення різних еталонних класів на основі апріорної інформації про геоботанічне районування території та польового дешифрування, була проведена автоматична класифікація та являє собою штучні нейронні мережі на основі багатоваріантного перцептрону. Мережа навчалася за допомогою методу зворотнього поширення помилки, помилка навчання складала менше 2%. На вхід класифікатору у ПЗ QGIS було подано файл синтезованого знімку (з додаванням значень нормованого водного індексу у вигляді додаткового каналу) та файл еталонів. На основі цих даних побудована залежність середньої яскравості у класі від довжини хвилі для різних типів поверхні. У результаті отримано зображення, у якому кожен піксель віднесений до одного з класів за спектральними образами еталонів (рис. 1).

Дешифрування водних рослин відбувалося за розташуванням і формою контура, його структурою, фототонном. Так, наприклад плавневі масиви повітряно-водної рослинності, а саме зарості рогуза і очерету на знімках мають вигляд видовжених ділянок та плям різного розміру і відрізняються інтенсивністю забарвлення контуру, а також мають виражену однорідну структуру та зберігають суху надводну вегетаційну масу в зимово-весняний період, що слугує гарною підказкою при дешифруванні, так як інша водна рослинність відмирає та опускається на дно водойми.

Серед чинників, які справляють і продовжують справляти визначальний вплив на формування екосистем водосховища та його функціонування в сучасних умовах, основними є перебіг внутрішньоводоймних процесів і техногенний (антропогенний) прес, зокрема такі його складові, як поетапне введення в дію водосховища, рівневий режим, режим попусків води і, особливо, евтрофікація та забруднення стічними водами, радіонуклідами та пестицидами. Під впливом цих чинників формується гідрохімічний

та гідробіологічний режим водосховища і відбувається адаптація гідробіонтів до нових умов існування, перебудовуються гідробіоценози. В той же час внутрішньоводоймні процеси стимулювали розвиток і самоорганізацію біоти водосховищ, що знаходить відображення в збільшенні видової різноманітності, зміні ресурсно-продукційного потенціалу та в процесах самоочищення [3].

Для оцінки стану водойми нами було використано показники концентрації у воді діоксиду вуглецю та хлорид-іонів на основі наземних спостережень ЦГО. Концентрація хлорид-іонів та її коливання, у тому числі добові, можуть бути одним із критеріїв забруднення водойми господарсько-побутовими стічними водами. Підвищений вміст хлоридів погіршує смакові якості води, робить її малопридатною для питного водопостачання та обмежує застосування для багатьох технічних і господарських цілей, а також для зрошування сільськогосподарських угідь. На території верхів'я водосховища простежується поступове зменшення кількості хлорид-іонів від 27,4 мг/л в 1985 р. до 20,1 мг/л в 2009 р.

Діоксид вуглецю (CO_2) є надзвичайно важливим компонентом та має винятково важливе значення для рослинних організмів (як джерело вуглецю). Крім того, діоксид вуглецю виконує важливу роль у гідрохімічних процесах: збільшує розчинність води і стає джерелом утворення іонів HCO_3^- і CO_3 . У той же час підвищені концентрації CO_2 пригнічують розвиток тваринних організмів. При високих концентраціях CO_2 води стають агресивними стосовно металів і бетону в результаті утворення розчинних гідрокарбонатів, що порушують структуру цих матеріалів.

За даними центральної геофізичної обсерваторії (а саме посту Страхолисса), відмічено різке зростання концентрації CO_2 від 1,9 мг/л в 1985 р. до 13,6 мг/л в 2009 р., при цьому головним джерелом надходження оксиду вуглецю в природні води є процеси біохімічного розпаду органічних залишків, окислювання органічних речовин, водяних організмів.

В якості методичної основи досліджень екологічного стану водосховища використовується системний підхід, що всебічно враховує взаємозв'язок процесів в складній системі, включаючи технічні, екологічні, економічні та соціальні аспекти.

Для прикладу детально розглянемо метод багатокритеріальної оптимізації для оцінки екологічного стану верхів'я Київського водосховища. Для оцінки динаміки заростання макрофітами та техногенного навантаження, були використані алгоритми методу багатокритеріальної оптимізації, що складаються з наступних етапів: введення функції близькості порівнюваних величин a і b , обчислення оцінки для функції близькості S та функції відповідності F_1 . Ця функція описує ступінь збігу значень порівнюваних величин [2]. Наприклад, порівнюються такі величини, як складові природно-територіальних комплексів (ПТК) водосховища за всі досліджувані роки за період 1985–2011 рр. відносно їх стану в 1985 р.

$$F_1(B, A) = \sum_{j=1}^n \rho(b_j, a_j) \cdot [1 - S(b_j, a_j)] , \quad (1)$$

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

Близькість значення параметру a до параметру b визначається за допомогою функції близькості

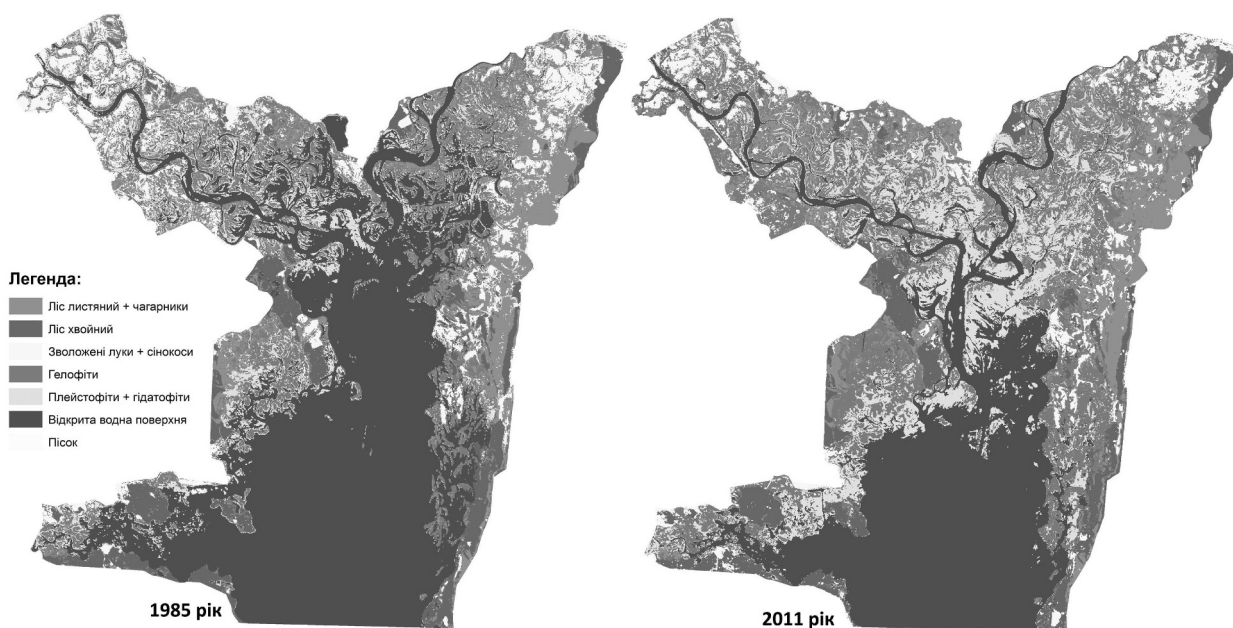


Рис. 1. Динаміка заростання верхів'я Київського водосховища за результатами керованої класифікації

Таблиця 1. Результати обчислення площ складових ПТК верхів'я Київського водосховища та функції відповідності F

Роки	Ліси листяні та чагар- ники, га	Ліси хвойні, га	Зволожені луки, га	Гелофіти, га	Гідрофіти та плейсто- фіти, га	Пісок, га	Вода, га	CO ₂ , мг/л	Хлориди, мг/л	F
1985	7673,6	3796,1	7046,7	8211,1	4519,0	85,1	29137,3			1
1987	8031,7	4139,4	6352,4	8249,1	5234,3	318,1	28143,9			0,983
1989	7921,8	3993,4	7147,6	8537,0	5588,9	186,7	27093,5	1,9	27,4	0,978
1991	8153,5	4040,8	7030,8	8815,7	7491,3	126,2	24810,6	1,7	26,2	0,936
1993	7298,3	4235,3	7115,4	9008,9	7665,9	126,8	25018,4	3,4	24,8	0,822
1995	7498,9	4448,3	7298,7	9485,1	7850,2	138,6	23749,1	3,3	26,0	0,781
1997	7030,5	4254,5	7944,4	8960,1	6218,4	199,6	25861,6	6,7	24,9	0,742
1999	7985,2	4632,2	6775,1	10353,2	8989,2	164,5	21569,7	7,1	22,0	0,678
2001	8103,3	4599,8	6497,0	11370,0	8809,2	188,1	20901,5	6,7	21,3	0,681
2003	7171,7	4609,6	5473,4	12639,1	9832,7	145,8	20596,5	10,4	24,0	0,652
2005	7756,9	4569,7	4227,3	13432,8	9539,9	195,5	20745,1	14,6	20,2	0,620
2007	8753,5	4585,4	4212,0	13223,9	8764,1	143,0	20787,1	12,6	21,3	0,626
2009	7367,7	4557,7	5283,6	12858,9	9013,4	137,2	21250,5	13,6	20,1	0,631
2011	8224,7	4528,7	4396,1	13716,5	9866,8	128,4	19607,8			0,605

$S_j(b_j, a_j)$ для наступних випадків:

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

$$S_j(b_j) = \frac{b_j - \bar{a}_j}{b_j}, \quad \text{для випадку } b_j > \bar{a}_j. \quad (2)$$

Тоді класифікація процесів або об'єктів може бути формалізована як задання багатокритеріальної оптимізації m критеріїв, кожний з яких виступає як функція відповідності характеристики b параметру a . У даній роботі для обчислення було використано розроблену у Центрі аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України спеціалізовану програму.

На основі дешифрування і аналізу КЗ Landsat 5 за період 1985–2011 рр. було отримано основні складові ПТК, а саме: ліси, луки, вища водна рослинність, пісок та відкрита водна поверхня. Наступним кроком був аналіз їх впливу на екологічний стан території. При цьому в якості критерію оцінки екологічного стану водосховища використовувалися показники концентрація CO₂, хлоридів та кольоровість надані ЦГО. Отримані результати розрахунків наведені в табл. 1. Обчислення функції відповідності F_1 для всіх років відповідно до рівняння (1) виконувалось відносно площ складових території за 1985 р., яка була умовно прийнята за еталон, відносно якого виконувалися обчислення за кожні роки досліджень. Для обчислення F_1 відповідно до (1) необхідне врахування значень вагових коефіцієнтів $\rho(b_j, a_j)$ для кожної складової ПТК.

Наступним етапом досліджень стали пошуки зв'язку екологічного стану міста з критерієм, який характеризує структуру складових ПТК, а саме — з функцією відповідності F_1 . Для цього було проведено оцінку кореляції між значеннями функцією F_1 та екологічним станом водосховища. Результати обчислень показали, що функція відповідності F_1 характеризує екологічний стан території з ймовірністю $R = 0,88$, яка цілком прийнятна для практичного використання оперативного дистанційного контролю екологічного стану території.

Висновки: будівництво каскаду водосховищ призвело до корінної трансформації природних ландшафтів на майже тисячокілометровій ділянці долини Дніпра. На місці затопленої заплави та частково борової тераси утворилося близько 140 тис. га мілководь, на яких під впливом комплексу різноманітних факторів сформувалися нові, специфічні ландшафти водосховищного типу. Найбільш інтенсивне заростання вищою водяною рослинністю відбувається у верхній частині водосховища, у затоках та у Дніпровському і Прип'ятському відрогах. Швидкість заростання мілководь вищими водяними рослинами залежить від їх захищеності від вітро-хвильових впливів, глибин, рівневого режиму, морфометрії, залитих біотопів та багатьох інших факторів.

В період з 1985 до 2000 р. дніпровська і прип'ятська дельти в Київському водосховищі існували окремо, а в 2000–2005 рр. вони з'єдналися і формують загальну дельту на акваторії між злиттям Дніпра і Прип'яті і місцем впадання р. Тетерів. Цей феномен став причиною істотного збільшення площ, зайнятих рогазом вузьколистим (*Typha angustifolia*) і очеретом звичайним (*Phragmites australis*) в 2011 р. — з 8211,1 га у 1985 р. до 13716,5 га у 2011 р.

На основі системних методів обґрунтовано обчислювання функції відповідності F_1 , яка має кореляцію взаємозв'язку з наземною оцінкою екологічного стану території з ймовірністю 0,88, що цілком

достатньо для оперативного контролю екологічного стану території на основі матеріалів ДЗЗ.

1. Досвід використання Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями (пояснення, застереження, приклади). — К.: Оріяни, 2006. — С. 39–42.
2. *Згуровский М.З., Панкратова Н.Д.* Системний аналіз. — К.: Наукова думка, 2005. — 743 с.
3. *Корелякова І.Л.* Екологічна характеристика водної рослинності Верхнього Дніпра // Питання екології і ценології водних організмів Дніпра. — К.: Вид-во АН УРСР, 1963. — С. 3–14.
4. *Романенко В.Д.* Основи гідроекології: Підручник для студентів екологічних і біологічних спеціальностей вищих навчальних закладів. — К.: Обереги, 2001. — 728 с.

Надійшла до редакції 20.06.2013