

УДК. 004.942+504.4:528.88

© О.В. Томченко, мол. наук. співробітник, аспірант

Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України,
м. Київ

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА НА ОСНОВІ МАТЕРІАЛІВ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ ТА НАЗЕМНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Розглянуто використання системного методу багатокритеріальної оптимізації для визначення зміни екологічного стану верхів'я Київського водосховища. Описано кореляцію значень наземних гідрохімічних показників стану водойми з отриманими за матеріалами дистанційного зондування Землі площами природно-територіальних комплексів (з 1989 по 2013 р.). Визначено основні чинники, які впливають на екологічну ситуацію водойми.

Ключові слова: метод багатокритеріальної оптимізації, матеріали космічної зйомки, індекси якості води, аквальна екосистема, макрофіти.

При розв'язанні задач комплексної оцінки екологічного стану водойм на основі інформації ДЗЗ та наземних даних, актуальним є використання системного підходу, сучасних методів моделювання та кількісного аналізу складних систем, можливостей сучасних інформаційних і комп'ютерних технологій. Реалізація комплексних методів досліджень щодо кожного конкретного природного об'єкту передбачає якісний аналіз та структурування проблеми, формування певних критеріїв оцінки, створення моделі складної екологічної системи, розроблення відповідної процедури оцінювання її стану. Системний підхід приводить до необхідності вирішення багатокритеріальних задач, тобто задач, в яких компромісний варіант досліджуваної системи вибирається за багатьма критеріями, коли необхідне досягнення найкращих значень одночасно для всіх критеріїв, кожен з яких характеризує одну із сторін проблеми, що розглядається.

В основі дослідження необхідно було оцінити поступові зміни, що відбуваються в аквальній екосистемі Київського водосховища, з використанням багаторічних космічних знімків КА Landsat5 та змоделювати за допомогою системних методів, а саме методу багатокритеріальної оптимізації, різні сценарії подальшого розвитку екологічного стану території.

Об'єкт дослідження та передумови. Створення Київського водосховища, як і взагалі Дніпровського каскаду в 1931–1976 рр., поряд з позитивними результатами поставило низку важливих екологічних проблем, без вирішення яких неможливе безпечне функціонування екосистеми Дніпра. В результаті створення водосховищ затоплено 694,8 тис. га земель,

а прилеглі до них підтоплені території з глибиною залягання ґрунтових вод до 2 м займають 93,5 тис. га [1].

Київське водосховище є верхнім у каскаді Дніпровських водосховищ і має найбільші за площею мілководні ділянки (314 км²), що займають 34% водного дзеркала. Основним компонентом мілководних ландшафтів водосховищ є вищі водні рослини (макрофіти), які не тільки виступають потужним фактором середовиществорення, але й можуть слугувати індикаторами стану водних екосистем. Як відомо з літературних джерел, основні масиви заростей макрофітів розташовані у верхній частині водосховища. Згідно з даними досліджень 1989 р. площі заростей досягли 132 км², запаси рослинності 106 тис. т сухої маси [2].

Матеріали та методи. Дослідження екологічного стану водосховища складалося з наступних етапів:

– дешифрування даних дистанційного зондування Землі, створення карт природно-територіальних комплексів водойми (ПТК);

– оцінка якості води за наземними даними на основі розрахунку зведених показників екологічного стану водосховища (індексу забруднення компонентами сольового складу, індексу трофічно-сапробіологічних показників, індексу специфічних показників токсичної дії, інтегрального екологічного індексу, гідрохімічного індексу забруднення води, сумарних показників хімічного забруднення води);

– застосування методу багатокритеріальної оптимізації для знаходження кореляції між динамікою заростання Київського водосховища макрофітами та отриманими наземними показниками якості води.

Для проведення ретроспективного аналізу структури заростання водосховища були використані дані дешифрування космічних знімків супутників Landsat TM та ETM+ (рис. 1) та картографічні матеріали.



а



б

Рис. 1 – Динаміка заростання верхів'я Київського водосховища на КЗ Landsat (а – станом на 08.05.1986; б – станом на 13.08.2013)

В ході дослідження розроблено процедуру тематичної обробки супутникових даних та наземної інформації, результатом якої є карти ПТК водойми за період 1985–2013 рр., проведена експертна оцінка екологічного стану водойми.

Отримані статистичні результати підтверджують, що заростання мілководдя водосховища відбувається за рахунок збільшення площ макрофітів, зокрема майже удвічі зростає площа гелофітної та гідрофітної рослинності (на 108,5 км²). При цьому площа відкритого водного дзеркала зменшилась на 32% (95 км²).

Показники екологічного стану водосховища. Екологічна оцінка якості води Київського водосховища виконана за середньорічними значеннями ряду гідрохімічних показників (CO₂, O₂, N_(заг), NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, P_(заг), PO₄³⁻, SO₄²⁻, Cl, HCO₃⁻, Cr⁴⁺, Ca⁺, K⁺, Mg⁺, Na⁺, Cu⁺, Fe⁺, нафтопродукти, феноли, СПАР, ДДТ, БСК5, біохромна окиснюваність, рН, прозорість, кольоровість, мінералізація, жорсткість, завислі речовини та ін.), наданих Центральною геофізичною обсерваторією МНС України за період від 1989 р. до 2012 р.

Узагальнення оцінок якості води за окремими показниками з визначенням інтегральних значень класів і категорій якості води виконувалося на основі аналізу показників у межах відповідних блоків відповідно до вимог “Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод відповідними категоріями” [3]. Це узагальнення полягало у визначенні значень для трьох блокових індексів якості води: забруднення компонентами сольового складу (*I*₁), трофосапробіологічного (еколого-санітарного) (*I*₂), специфічних показників токсичної і радіаційної дії (*I*₃). Факторний індекс (*I*_{факт.}) визначався за відношенням усереднених значень однієї з характеристик у кожному блоці до їх регламентованих величин та розраховується за формулою:

$$I_{\text{факторний}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \text{ де } N_i - \text{ номер категорії (1)}$$

<i>I</i> ₁	<i>I</i> ₂	<i>I</i> ₃
Індекс забруднення компонентами сольового складу	Індекс трофо-сапробіологічних показників (еколого-санітарний)	Індекс специфічних показників токсичної дії
<ul style="list-style-type: none"> • сума іонів; • хлориди; • сульфати. 	<ul style="list-style-type: none"> • рН; • завислі речовини; • азот амонійний; • азот нітритний; • азот нітратний; • фосфор; • розчинений кисень; • % насичення води киснем; • перманганатна окиснюваність; • біохроматна окиснюваність; • БСК5. 	<ul style="list-style-type: none"> • мідь; • хром; • залізо; • цинк; • марганець; • нафтопродукти; • феноли; • СПАР.

Визначення об'єднаної оцінки якості води полягало в обчисленні інтегрального, або екологічного індексу (I_E) – як середнє арифметичне значення від трьох факторних індексів:

$$I_E = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}, \quad (2)$$

де I_1 – індекс забруднення компонентами сольового складу;

I_2 – індекс трофо-сапробіологічних (еколого-санітарних) показників;

I_3 – індекс специфічних показників токсичної дії;

I_E – екологічний індекс (інтегральний).

Гідрохімічний індекс забруднення води (ІЗВ), розроблений ще Держкомгідрометом СРСР, відноситься до категорії показників, що найчастіше використовуються для оцінки якості водних об'єктів. Цей індекс є типовим адитивним коефіцієнтом і середньою часткою перевищення ГДК за суворо лімітованою кількістю індивідуальних інгредієнтів [4]. Розрахунок *ІЗВ* проводився за обмеженим числом інгредієнтів. Визначалося середнє арифметичне значення результатів хімічних аналізів по кожному з таких показників, як: азот амонійний, азот нітритний, нафтопродукти, феноли, розчинений кисень, біохімічне споживання кисню (БСК5). За результатами аналізів кожного з показників виводилось їх середньоарифметичне значення, що порівнювалось з їх ГДК. *ІЗВ* розраховується за формулою:

$$ІЗВ = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (3)$$

де C_i – середня концентрація одного із шести показників якості води;

$ГДК_i$ – гранично допустима концентрація кожного із шести показників якості води.

В якості різновиду *ІЗВ* також використовують *сумарний показник хімічного забруднення води (ПХЗ-10)*, який його авторами називається «формалізованим»; він розраховується по десяти сполуках замість шести, з використанням формули підсумовування дії:

$$ПХЗ-10 = (C_1/ЛДК_1 + C_2/ЛДК_2 + \dots + C_{10}/ЛДК_{10}), \quad (4)$$

де C_i – концентрація хімічних речовин у воді, мг/дм³;

$ЛДК_i$ – гранично допустима концентрація, мг/дм³.

ПХЗ-10 найчастіше використовують для виявлення зон надзвичайної екологічної ситуації та зон екологічного лиха. Проте в наших дослідженнях він був використаний для відстеження довготривалих змін, що могли мати місце в екосистемі верхніх ділянок Київського водосховища, оскільки дозволяє враховувати як перебіг природних процесів, так і зміни антропогенного характеру. Так, всі показники було розділено на дві групи та розраховано *ПХЗ-10 (фіз-хім.)* та *ПХЗ-10 (антр.)*. До першої групи ввійшли показники, що відповідають за фізико-хімічні властивості води, газовий склад та головні іони, а до другої групи – забруднюючі речовини органічного походження та біогенні компоненти. Розрахунки проводилися згідно з [5].

Метод багатокритеріальної оптимізації. При вирішенні задач, для яких потрібно одночасне досягнення найкращих значень для всіх критеріїв, кожний з яких характеризує одну зі сторін розглянутої проблеми, використовується метод багатокритеріальної оптимізації. При цьому процес вибору є ітераційним з використанням єдиного узагальненого критерію. Задача визначення класу об'єкта полягає у визначенні, до якого з розглянутих класів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_m\}$ найбільшою мірою належить об'єкт $B = \{b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m\}$, який класифікується (a і b – параметри, які порівнюються, тобто складові ПТК чи гідрохімічні показники за всі досліджувані роки у період з 1989 до 2011 рр. відносно їх стану в 1989 р.).

Для рішення таких задач використовуються алгоритми, що складаються з наступних етапів: введення функції близькості порівнюваних величин a і b , обчислення оцінки для функції близькості – S та функції відповідності – f для досліджуваного об'єкту по опорній множині класів. Функція відповідності описує ступінь збігу значень порівнюваних величин. Вибір тієї чи іншої функції відповідності визначається характером задачі [6].

Для оцінки ступеня належності об'єкту (процесу) A до об'єкту (процесу) B визначається функція належності, як єдиного узагальненого критерію:

$$F(B, A) = \sum_{j=1}^n \rho(b_j, a_j) \cdot f(b_j, a_j). \quad (5)$$

Обчислення оцінок на опорній множині означає визначення близькості між усіма параметрами одного класу і об'єктом, що класифікується, з врахуванням міри важливості характеристик класу – $\rho(b_j, a_j)$. Найбільшого значення функція приналежності досягає при співпадінні значень всіх параметрів, а найменшого значення – рівного нулю, коли не відповідає жодному параметру.

Функції відповідності значення параметра a до параметра b визначається

$$f(b_j, a_j) = [1 - S_j(b_j, a_j)]. \quad (6)$$

Функція відповідності f має тим більше значення, чим менша похибка, тобто, чим менша різниця між значенням вимірюваної характеристики задачі та значенням параметра апаратури.

Визначаємо близькість значення параметра a до параметра b за допомогою функції близькості – $S_j(b_j, a_j)$ для наступних випадків:

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

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

Тепер класифікація процесів чи об'єктів може бути формалізована як задача багатокритеріальної оптимізації m критеріїв, кожний з яких виступає як функція відповідності характеристики b параметру a .

Результати: 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. Далі було обчислено функцію відповідності $F_{(ДЗЗ)}$ за всі роки досліджень відповідно до рівняння (5) відносно площ складових ПТК у 1989 р., яка була умовно прийнята за еталон. Наступним кроком був аналіз їх впливу на екологічний стан території. За результатами ретроспективного аналізу рядів гідрохімічних даних для більш повного уявлення про стан екосистеми в цілому були проведені розрахунки ряду індексів та показників, результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Екологічна оцінка якості води Київського водосховища

Роки	I_1^1	I_2^2	I_3^3	I_E^4	$I_{ЗВ}^5$	$ПХЗ-10$ (фіз-хім.) ⁶	$ПХЗ-10$ (антр.) ⁷	Сумарний N^8	$F_{(назем.)}^9$	$F_{(ДЗЗ)}^{10}$
1989	1,3	2,5	4,0	2,6	0,7	5,3	3,9	0,2	0,71	0,90
1991	1,3	2,5	3,1	2,3	0,4	6,2	2,3	0,2	0,67	0,86
1993	1,3	3,2	5,0	3,1	1,8	17,6	7,2	0,4	0,58	0,85
1995	1,3	3,5	4,0	2,9	1,7	13,9	7,1	1,2	0,52	0,83
1997	1,3	3,4	3,5	2,7	0,9	12,5	5,4	0,4	0,47	0,87
1999	1,3	3,5	3,4	2,8	0,8	21,7	3,8	0,5	0,46	0,78
2001	1,3	3,6	4,1	3,0	1,8	22,0	9,8	0,3	0,47	0,75
2003	1,3	3,7	2,8	2,6	0,8	21,4	3,9	0,8	0,47	0,71
2005	1,0	3,5	2,4	2,3	0,6	36,8	2,2	0,5	0,52	0,68
2007	1,3	3,5	2,6	2,5	0,7	24,2	4,4	0,6	0,44	0,72
2009	1,0	3,7	3,4	2,7	0,9	19,0	4,0	0,7	0,48	0,73
2011	1,3	3,4	3,3	2,7	0,9	21,7	4,0	0,7	0,54	0,70

Де:

1. I_1 – індекс забруднення компонентами сольового складу;
2. I_2 – еколого-санітарний індекс;
3. I_3 – індекс показників токсичної дії;
4. I_E – загальний екологічний індекс;
5. $I_{ЗВ}$ – індекс забруднення води;
6. $ПХЗ-10$ (фіз-хім.) – показник хімічного забруднення води за фізико-хімічними властивостями;
7. $ПХЗ-10$ (антр.) – показник хімічного забруднення води за речовинами органічного походження та біогенними компонентами;
8. Сумарний N – сумарна концентрація азоту амонійного, нітратного та нітритного;
9. $F_{(назем.)}$ – функція належності отримана на основі методу багатокритеріальної оптимізації всіх хімічних показників;
10. $F_{(ДЗЗ)}$ – функція належності отримана на основі дешифрування матеріалів ДЗЗ.

При цьому в якості критерію оцінки екологічного стану водосховища використовувалася зведена функція відповідності $F_{(назем.)}$, розрахована на основі середньорічної концентрації всіх наявних хімічних показників. З графіка (рис. 2) видно, що функції F , отримані за результатами дешифрування знімків та наземними даними, відображають зміну стану водойми

Київського водосховища в бік незначного погіршення якості води Київського водосховища для водогосподарських потреб, що підтверджують показники інтегральних індексів, розраховані загальноприйнятим методом.

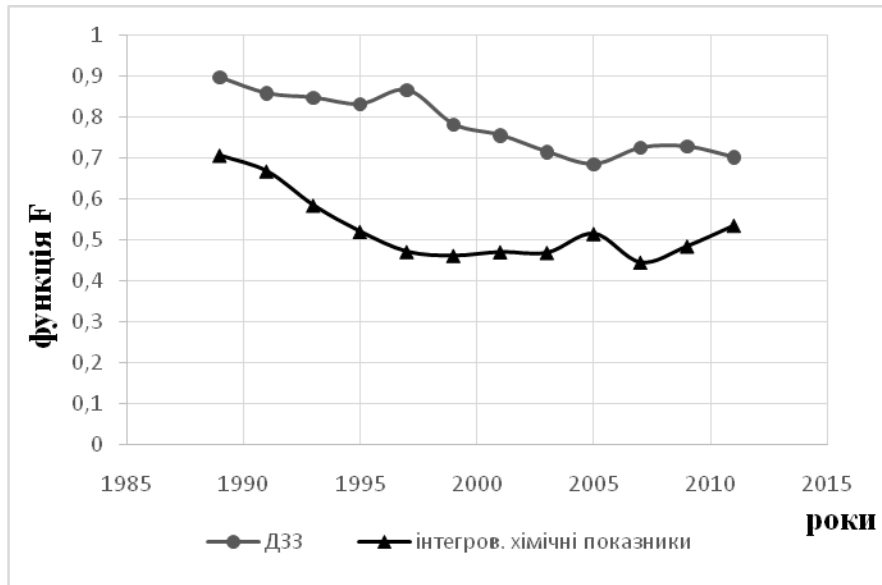


Рис. 2 – Функції F отримані за даними ДЗЗ та наземними хімічними показниками

На підставі проведених розрахунків екологічної оцінки якості води верхів'я Київського водосховища можна констатувати:

1) за еколого-санітарним блоком спостерігається тенденція до погіршення, значення індексу зростає від 2,5 до 3,7. Так, стан водойми на 1989 рік відповідає II класу якості води («дуже добрі», «чисті» води) та змінюється до III класу якості (води, перехідні за якістю від «добрих», «досить чистих» до «задовільних», «слабо забруднених») станом на 2011 рік;

2) за критерієм специфічних речовин токсичної та радіаційної дії навпаки простежується позитивна динаміка. Так, якість води водосховища станом на 1993 р. відноситься до III класу якості («посередніх», «помірно забруднених» вод), а в 2011 р. – до II класу («добрих», «досить чистих») з тенденцією наближення до «задовільних», «слабо забруднених» вод);

3) величина інтегрального екологічного індексу I_E коливається в межах від 2,3 до 3,1, що дає підставу віднести водойму в цілому до II класу якості води, 3-ї категорії. Вода за якістю оцінюється як «добра» за станом, «досить чиста» за ступенем чистоти;

4) отримані значення індексу забруднення води відповідають II класу якості «чисті води» і коливаються в межах 0,4–1,1 (окрім 1993, 1995 та 2001 років – стан «помірно забруднені води»);

5) простежується зростання концентрації сумарного азоту, що може бути спричинене як інтенсивністю розкладу органічних речовин, так і збільшенням антропогенної евтрофікації вищерозташованих ділянок річок Дніпра та Прип'яті.

Висновки: на основі системних методів доведено взаємозв'язок функції відповідності $F_{ДЗЗ}$ з $F_{назем.}$, яка має кореляцію з ймовірністю 0,76, що цілком достатньо для оперативного

контролю екологічного стану території на основі матеріалів ДЗЗ. За гідрохімічними показниками якості води акваторії верхніх ділянок Київського водосховища відповідають водам задовільної якості, що здатні забезпечувати умови існування біотопів широкого екологічного спектра. Зміни гідрохімічного складу вод акваторій спричинені перебігом природних процесів та вторинних сукцесій, а саме – збільшенням об'ємів продукованого CO₂, підвищенням значень вмісту біогенів у результаті інтенсифікації процесів заростання та заболочення даної ділянки водосховища, спровокованого штучним зменшенням водообміну водойми після аварії на Чорнобильській АЕС.

Список використаної літератури

1. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду // За ред. А.В. Яцика. – К.: Генеза, 2003. – 176 с.
2. Растительность и бактериальное население Днепра и его водохранилищ / Л.А. Сиренко, И.Л. Корелякова, Л.Е. Михайленко и др. / Под. ред. Н.В. Кондратьевой. – Киев: Наук думка, 1989. – 232 с.
3. Досвід використання “Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями” (пояснення, застереження, приклади) А.В. Яцик, В.М. Жукинський, А.П. Чернявська. – К.: Оріяни, 2006. – 60 с.
4. Осадчий В.І., Набиванець Б.Й., Осадча Н.М., Набиванець Ю.Б. Гідрохімічний довідник: Поверхневі води України. Гідрохімічні розрахунки. Методи аналізу. – К.: Ніка-Центр, 2008. – 656 с.
5. Комплексные оценки качества поверхностных вод / Под ред. А.М. Никанорова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 139 с.
6. Федоровский А.Д., Даргейко Л.Ф., Зубко В.П., Якимчук В.Г. Системный подход к оценке эффективности аппаратурных комплексов дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. – 2001. – Т. 7. № 5–6. – С. 75–79.

Стаття надійшла до редакції 07.02.14 українською мовою

© О.В. Томченко

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КИЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Рассмотрено использование системного метода многокритериальной оптимизации для определения изменения экологического состояния верховья Киевского водохранилища. Описано корреляцию значений наземных гидрохимических показателей состояния водоема с полученными по материалам дистанционного зондирования Земли площадями природно-территориальных комплексов (с 1989 по 2013 г.). Определены основные факторы, которые влияют на экологическую ситуацию водоема.

© O.V. Tomchenko

**USAGE OF MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF REMOTELY SENSED DATA AND
IN-SITU MEASUREMENTS FOR ASSESSING THE ECOLOGICAL CONDITION
OF KIEV RESERVOIR**

The use of the systematic multiobjective optimization method for determining the ecological condition of Upper Kiev reservoir is reviewed. The correlation between values of hydrochemical indicators of reservoir measured on the ground and changes in the area of natural-territorial complexes (from 1989 to 2013) obtained using remotely sensed data is described. The main factors that affect the environmental situation of the reservoir are determined.