

УДК. 528.88

О.В. Томченко, м.н.с.; Л.В. Підгородецька, к.т.н., н.с.;
О.Д. Федоровський, д.ф.-м.н, проф., чл.-к. НАН України

ДУ Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук
НАН України, м. Київ (Україна)

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДОЙМ НА ОСНОВІ КОСМІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ (НА ПРИКЛАДІ ОЗ. СВІТЯЗЬ ТА ВЕРХІВ'Я КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА)

Розглянуто методику комплексної оцінки екологічного стану водойм з використанням космічної інформації ДЗЗ та наземних даних на основі сучасних методів моделювання і кількісного аналізу складних систем. Описано особливості дешифрування космічних знімків та визначення інформативних ознак природно-територіальних комплексів водойм. Обґрунтовано використання мультифрактальної моделі опису різноманіття вищої водної рослинності оз. Світязь та верхів'я Київського водосховища.

ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ, ДЕШИФРУВАННЯ, МАКРОФІТИ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ,
ФРАКТАЛИ

На сучасному етапі використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) сприяє вирішенню широкого кола завдань моніторингу стану навколишнього середовища на загальнодержавному, регіональному та локальному рівнях. Одним з найбільш актуальних серед них є моніторинг та прогнозування змін екологічного стану водних об'єктів, погіршення якого може призвести до серйозних екологічних та соціально-економічних наслідків.

Розроблена методика орієнтована на використання космічних знімків ДЗЗ та наземних даних, а також системного підходу, сучасних методів моделювання та кількісного аналізу складних систем, можливостей сучасних інформаційних і комп'ютерних технологій для розв'язання задач комплексної оцінки екологічного стану водойм. Реалізація комплексних методів досліджень щодо кожного конкретного природного об'єкту (озера чи водосховища) передбачає якісний аналіз та структурування проблеми, формування певних критеріїв оцінки, створення моделі складної екологічної системи, розроблення відповідної процедури оцінювання її стану [4].

Оперативне використання космічної інформації ДЗЗ, подальший аналіз та математичне моделювання змін структури розподілу природно-територіальних комплексів (ПТК) під впливом антропогенного навантаження дозволяє значно скоротити необхідний обсяг польових робіт, вчасно оцінити екологічний стан водойм, прогнозувати наслідки антропогенних впливів на екосистеми водойм.

На основі розробленої методики було проаналізовано екологічний стан наступних водних об'єктів: озера Світязь (Шацького району Волинської області) та верхів'я Київського водосховища в межах Київської та Чернігівської областей України.

Обґрунтування методики застосування інформації ДЗЗ для оцінки екологічного стану водойм

Для одержання обґрунтованих оцінок і прогнозів стану водних ресурсів, визначення тенденцій та кількісних характеристик інтенсивності досліджуваних процесів необхідно провести великий обсяг традиційних інженерно-геологічних, гідрогеологічних, геохімічних та інших польових та лабораторних досліджень, які часто є складними та фінансово витратними. У той же час існують методи визначення ряду параметрів водних об'єктів за допомогою дистанційної зйомки, що є більш перспективним.

Сучасний рівень розвитку приладо-апаратурних засобів космічного зондування дозволяє отримувати інформацію не лише про територіальні характеристики водних об'єктів, але й оцінювати низку їх санітарно-біологічних параметрів, діагностувати стан водойм та процеси, що відбуваються у товщі води. Космічна зйомка може застосовуватися для інвентаризації та контролю гідрографічної і гідротехнічної мережі заплави річок у районах урбанізації, виявлення місць надходження стічних вод, контролю динаміки розповсюдження завесі по акваторії, визначення зон "цвітіння" та теплового забруднення водойм, оцінки якості води.

Залучення великих обсягів водних ресурсів у господарський обіг, скидання неочищених стічних вод у прісні водойми, хімізація сільського господарства, порушення природного гідрологічного режиму на водозабірних площах призвели до порушення природної рівноваги, різкого зниження якості водоресурсного потенціалу, переважання деградаційних процесів над самовідновною і самоочисною здатністю водних систем [2]. В Україні спостереження за гідрохімічним і радіологічним станом поверхневих вод проводиться басейновими водогосподарськими об'єднаннями та обласними управліннями Держводгоспу, вимірювання здійснюються наземними контактними методами.

Таким чином, з метою найбільш докладного вивчення змін у водних екосистемах є доцільним використання як екосистемного, так і популяційного підходів. При цьому розрахункові методи вивчення водних екосистем повинні відрізнятися від методів і алгоритмів кількісного аналізу наземних біогеоценозів.

Для того, щоб простежити й усвідомити сутність і ступінь сучасних і майбутніх екологічних змін у водних об'єктах, необхідно мати:

- деякий набір інтегральних показників якості екосистем, гідробіологічних вимірювань, що отримуються за допомогою традиційних технічних засобів та засобів ДЗЗ;
- технологію квантування діапазону зміни кожного показника відповідно до встановлених границь норми-патології;
- спосіб розрахунку формалізованих інтегральних кількісних оцінок, що дозволяє враховувати комплексний вплив усього різноманіття складових екологічних факторів.

Методологія та результати дослідження

Модель оцінки екологічного стану водойми складається з таких етапів:

- дешифрування космічних знімків, визначення інформативних ознак природно-територіальних комплексів (ПТК) водойм (розрахунку NDVI та розподілу температури, виконання контрольованої та неконтрольованої класифікації знімків);

- експертна оцінка екологічного стану водойм за наземними даними на основі методу аналізу ієрархій;
- застосування методу багатокритеріальної оптимізації [3];
- застосування методу адаптивного балансу впливів та моделювання і прогноз динаміки екологічного стану водойми при зміні рекреаційного навантаження;
- застосування мультифрактального аналізу для оцінки структури розподілу природно-територіальних комплексів водойм.

Детальніше розглянемо застосування мультифрактального аналізу для оцінки структури розподілу природно-територіальних комплексів водойм

Створення просторово-розподіленої моделі структури ПТК водойм

Для дослідження динаміки розподілу ПТК макрофітів на основі отриманих за знімками карт розподілу ПТК було створено просторово-розподілену модель структури ПТК водойм. Ця модель є універсальною, дозволяє значно скоротити витрати на проведення польових робіт при виконанні екологічних досліджень, дозволяє формувати різномасштабні проби, як і пробу з площі всього біотопу (генеральну вибірку) для обчислення розподілів ПТК по озеру. Іншою відмінною рисою є миттєвий характер вибірки.

Для створення просторово-розподіленої моделі структури ПТК оз. Світязь на карту розподілу ПТК оз. Світязь накладемо прямокутну сітку розміром $K=32 \times 32$ комірки.

Розподіл ПТК по j типам в комірці k задається n -мірним вектором:

$$\tilde{P}(k) = \{N_j(k) \mid j = \overline{1, n}\}; \quad k = \overline{1, K}, \quad (1)$$

де N_j – кількість пікселів, зайятих j -тим ПТК.

Кожна комірка сітки моделює розмір вибірки та місце відбору проб. Збільшення розміру комірок послідовно у 2 рази моделює збільшення розмірів проб.

Моделюємо відносний розподіл ПТК за типами:

$$p_j(k) = N_j(k) / N(k); \quad j = \overline{1, n}; \quad k = \overline{1, K}; \quad \sum_{j=1}^n p_j(k) = 1, \quad (2)$$

де $N(k)$ – загальна кількість пікселів всіх ПТК в комірці з номером k . Надаючи в формулі (2) значення $p_j(k)$ ймовірного трактування, можна визначати розподіли ймовірностей ПТК за водоймою та вивчати закони розподілу. Надалі ця модель використовується в роботі для побудови за генеральною вибіркою апроксимуючого розподілу ПТК статистичного мультифрактала, визначення його спектру узагальнених розмірностей і за розмірностями встановлення змін в структурі природно-територіальних комплексів під дією зовнішніх факторів середовища, тобто екологічних оцінок.

Отже, за кожною з карт розподілу ПТК оз. Світязь в середовищі ArcGIS здійснюємо відокремлення пікселів одного виду ПТК та розрахунок зональної статистики з визначенням кількості пікселів (площі) кожного типу ПТК в кожній комірці. Для подальшого застосування мультифрактального аналізу структури ПТК водойми дані

просторово-розподіленої моделі структури ПТК водойми формуються за шарами розподілу окремих ПТК у вигляді таблиць у зручному для програмної обробки текстовому форматі.

Таким чином, в якості критеріїв оцінок екологічного стану оз. Світязь в рамках екосистемного підходу обрано низку найбільш динамічних протягом періоду спостережень показників гідрологічного режиму, сольового складу, трофо-сапробної групи, а також показник рекреаційного навантаження на екосистему як такий, що відбиває інші невраховані забруднення та механічний вплив на вищу водну рослинність.

Дослідження та оцінка динаміки змін ПТК водойм засобами фрактального аналізу на основі космічних знімків

Опрацювання просторово-розподіленої моделі структури ПТК водойм, сформованої на основі карт, отриманих за даними ДЗЗ, дозволило дослідити динаміку змін структури ПТК оз. Світязь та Київського водосховища за роками спостереження (з 1989 до 2013 р.). Застосувавши до цих даних основні положення фрактального аналізу, побудуємо мультифрактал із заданими властивостями.

Мультифрактал при цьому розглядається як статистично самоподібна структура з m типів ПТК. Номер ПТК у реєстрі $j=1, 2, \dots, m$. Для вибірки розміром N , що містить N_j ПТК j -того типу визначається відносною чисельністю знаходження j -того типу ПТК у вибірці:

$$p_j = N_j / N; j = \overline{1, m}; \sum_{j=1}^m p_j = 1, \quad (3)$$

Для вимірювання співвідношень між площами різних ПТК у кожній вибірці (пробі) розраховується узагальнена сума $Z_q(N)$, що формується як сума відносних чисельностей (значимостей) ПТК p_j , піднесених у різні показники степеня q . Тобто, розкладаємо відносні значимості в одній вибірці за степенями q . Оскільки через нормування усі $0 \leq p_j \leq 1$, то узагальнена сума $Z_q(N)$ завжди додатна, і при від'ємних значеннях q стає великою, якщо у вибірці є рідкісні види ПТК. При додатних значеннях ступеня q навпаки – сума стає великою при збільшенні домінуючих типів ПТК у вибірці. В подальшому це визначення є важливим.

Для застосування методів фрактального аналізу до оцінки розподілів чисельностей і до чисельності площ, зайнятих різними типами ПТК по озеру, використовуються апроксимаційні формули степеневих розподілів узагальнених статистичних сум $Z_q(N)$ від розміру площ ділянок обстеження (вибірок) N :

$$Z_q(N) = b_q N^{\tau(q)}, \quad (4)$$

або в логарифмічному масштабі:

$$\ln Z_q(N) = \ln b + \tau(q) \ln(N), \quad (5)$$

де b_q – константа для кожного значення q , що визначається в процесі апроксимації [1].

За знайденими за формулою (5) значеннями функції $\tau(q)$ визначаються узагальнені фрактальні розмірності:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{1-q}. \quad (6)$$

Отже, розрахуємо узагальнені суми $Z_q(N)$ – суми відносних чисельностей p_j , піднесені до степеня q , що виявлені у вибірці розміром N з S типів ПТК:

$$Z_q(N) = \sum_{j=1}^S p_j^q, q \in [q_{\min}, q_{\max}] \subset \mathbf{Z}, q_{\min} < 0, q_{\max} > 0. \quad (7)$$

Встановимо $q_{\min} = -10, q_{\max} = 10$.

Знаходимо значення узагальнених статистичних сум $Z_q(N)$ на обсязі вибірки $N=N_{total}$, що дорівнює вибірці з площі всього озера по кожному з років спостережень.

Задача апроксимації розподілів для кожного року зводиться до визначення 21 значення τ , обчислюваних з системи рівнянь (5). Для цього використаємо $2(q_{\max} - q_{\min} + 1)$ значень $\ln Z_q(N)$. Одну групу значень логарифмів узагальнених сум обчислено з площі всього озера.

Другу групу значень логарифмів узагальнених статистичних сум визначимо з тієї умови, що мінімальною просторовою одиницею вибірки є 1 піксель, який може містити лише 1 тип ПТК:

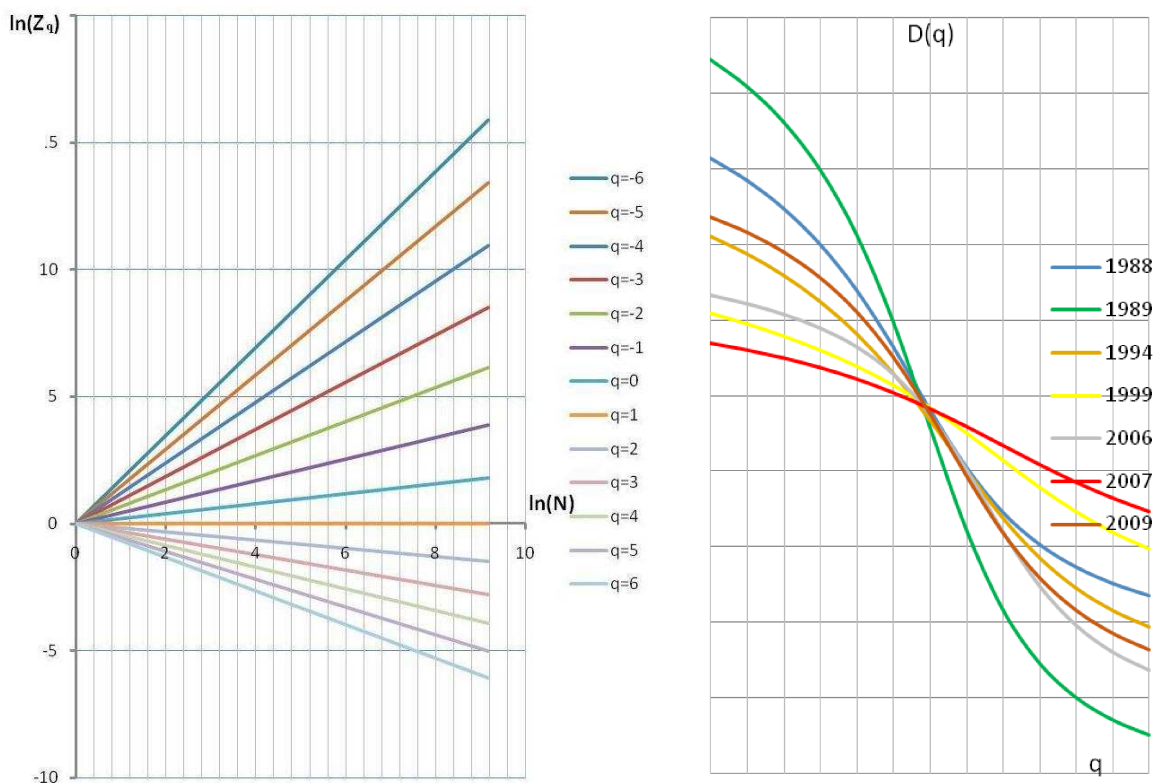
$$\ln Z_q(N=1) = 0, \forall Z_q, q = \overline{-10, 10}. \quad (8)$$

Таким чином, за кожним із років можна побудувати степеневу залежність $\ln Z_q(N)$ від розміру вибірки N (в білогарифмічній системі координат) (рис. 1а).

Наступним етапом побудови мультифрактала є побудова залежності показника степеня $\tau(q) = \lim_{N \rightarrow total} \frac{\ln Z_q(N)}{\ln N}$ від q , де $\tau(q)$ знаходиться як тангенс кута нахилу

прямих (рис. 2а). Наочно спектри розмірностей D_q від q по роках спостережень представлено на рис. 1б та 2б. З графіка видно, що D_q є незростаючою функцією від q .

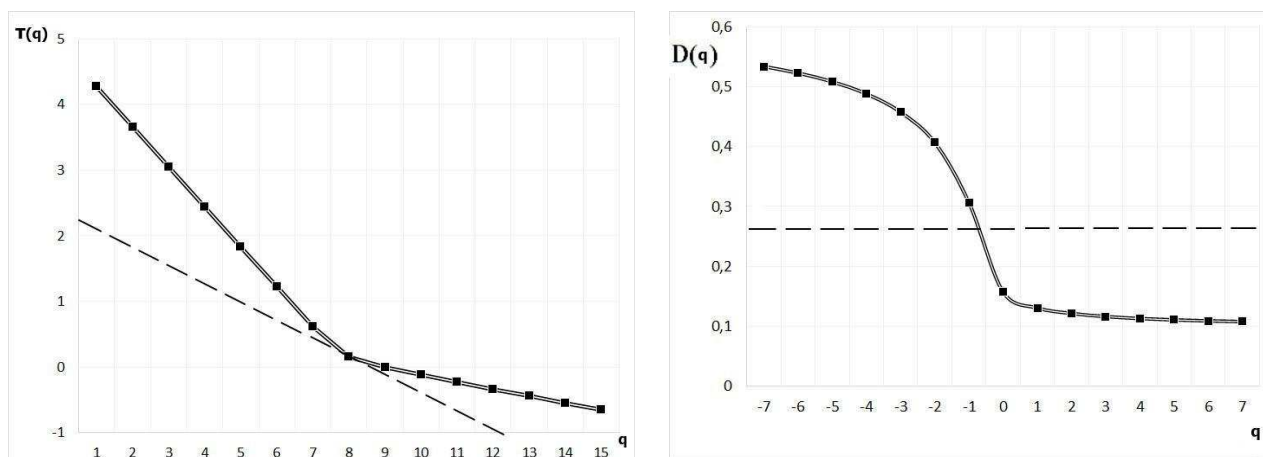
Отже, структура ПТК оз. Світязь є мультифрактальною, і може бути описана спектром D_q узагальнених розмірностей. Зберігається певне функціональне статистичне співвідношення між домінуючими, рідкісними і звичайними типами ПТК. Це співвідношення не залежить від обсягу вибірок і дозволяє говорити про статистичну самоподібність структури ПТК озера.



а) спектр узагальнених статистичних сум Z_q за даними 2009 р

б) графіки залежності D_q від q за окремі роки спостережень

Рисунок 1 – Результати мультифрактального аналізу оз. Світязь



а) графік залежності показника степеня τ від q

б) графік залежності D_q від q

----- лінія рівного розподілу – всі типи ПТК мають рівні площі у виборках, $D(q=0) = D(q)$

Рисунок 2 – Результати мультифрактального аналізу Київського водосховища

Таким чином, за даними ДЗЗ за роками спостережень визначено мультифрактальні розмірності D_q розподілу природно-територіальних комплексів оз. Світязь, $-10 \leq q \leq 10$ та Київського водосховища $-7 \leq q \leq 7$. Встановлено кореляційний зв'язок експертних оцінок екологічного стану водойм з мультифрактальними розмірностями $D(q < 0)$, отриманими на

основі космічної інформації ДЗЗ, що доводить можливість проведення експрес-діагностик екологічного стану водойм за змінами розподілів відносних площ, зайнятих ПТК.

На основі отриманих результатів класифікації знімків за період в 25 років та системного аналізу можна стверджувати, що зарегулювання великих рівнинних річок призвело до зміни типу заплавоутворення. Загалом відбувається відторгнення акваторій Київського водоймища заплавою, що утворюється заново. Природа прагне до реалізації вже наявних у її арсеналі рішень, і в подібних умовах формуються подібні ландшафтні комплекси. Таким чином, водоймища, техногенні за своїм походженням водні об'єкти, з плином часу все більше набувають рис природних водойм, і, таким чином, формують новий, квазіприродний, або напівприродний ландшафт річкової долини.

Висновки. Запропонована методика забезпечує детальний аналіз проблеми оцінювання екологічного стану водних екосистем за рахунок спільного застосування як екосистемного, так і популяційного підходів в екологічних дослідженнях водойм. Запропоновані в рамках популяційного підходу для опису структури просторового розподілу ПТК водної екосистеми узагальнені фрактальні розмірності $D(q)$ можуть слугувати інформативними показниками динаміки стану біоти водойми, що опосередковано відбиває екологічний стан водойми загалом.

Література

1. Артюшенко М.В. Мультифрактальный анализ биоразнообразия и ценотической структуры сообщества растений по данным дистанционного зондирования / М.В. Артюшенко, Л.Н. Зуб, Л.В. Подгородецкая, А.Д. Федоровский // Доповіді Національної академії наук України. – 2011. – № 9. – С.132–141.
2. Загальнодержавна програма розвитку водного господарства (затверджена Законом України №2988-111 від 17.01.2002) / Відомості Верховної Ради України. – 2002. – № 25. – с.172.
3. Многокритериальные методы принятия решений / [С. В. Емельянов, О. И. Ларичев]. — М.: Знание, 1985. — 32 с. — (Серия «Математика, кибернетика»: № 10).
4. Тоценко В. Г. Методы и системы поддержки принятия решений. Алгоритмический аспект / Тоценко В. Г. — К. : Наукова думка, 2002. — 382 с.

Стаття надійшла до редакції 28 листопада 2013 р. українською мовою

О.В. Томченко, Л.В. Подгородецкая, А.Д. Федоровский

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЕМОВ НА ОСНОВЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ (НА ПРИМЕРЕ ОЗ.СВИТЯЗЬ И ВЕРХОВЬЯХ КИЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)

Рассмотрена методика комплексной оценки экологического состояния водоемов с использованием космической информации ДЗЗ и наземных данных на основе современных методов моделирования и количественного анализа сложных систем. Описаны особенности дешифрирования космических снимков и определения информативных признаков природно-территориальных комплексов водоемов. Обосновано использование мультифрактальной модели описания разнообразия высшей водной растительности оз. Свитязь и верховья Киевского водохранилища.

Olga Tomchenko, Ludmila Pidgorodetska, Alexander Fedorovsky

THE COMPLEX ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL STATE OF WATER BODIES USING REMOTELY SENSED DATA (FOR EXAMPLE LAKE SVITYAZ AND UPPER KIEV RESERVOIR)

The method of complex estimation of ecological status of water bodies using remotely sensed data and in-situ measurement based on modern modeling techniques and quantitative analysis of complex systems is reviewed. The decoding of satellite images and defining informative features of the natural-territorial complexes reservoirs are described. The proof of the multifractal model for describing the diversity of communities of higher aquatic plants in Lake Svityaz and Upper Kiev reservoir is given.