

УДК 504:528

**А.В. ХИЖНЯК, О.В. ТОМЧЕНКО, Т.М. ДЬЯЧЕНКО,
О.Д. ФЕДОРОВСЬКИЙ**

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СКЛАДОВИХ ПЛАВНЕВО-ЛІТОРАЛЬНОГО ЛАНДШАФТУ КІЛІЙСЬКОГО ГИРЛА ДУНАЮ НА ОСНОВІ КОСМІЧНОЇ І НАЗЕМНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

***Анотація.** У статті обґрунтовано на прикладі Кілійського гирла Дунаю можливість проведення оцінки варіабельності складових плавнево-літорального ландшафту гирлових областей річок на основі мультифрактального аналізу матеріалів космічної зйомки. В результаті дослідження за матеріалами космічних знімків в досліджуваній період простежується зростання майже вдвічі площ дерев'янисто-чагарникової рослинності та зменшення площ трав'янистої рослинності, що може бути пов'язане із суцесійними процесами, що відбуваються в екосистемах плавнево-літорального ландшафту. Про подальше наростання дельти також свідчить збільшення площі піску вдвічі. При цьому використання мультифракталів допомогло математично довести зміну ландшафтної структури в бік збільшення частки дрібних складових.*

***Ключові слова:** ландшафтні комплекси, космічна інформація, мультифрактальний аналіз, Дунай, Кілійське гирло.*

Вступ

При вивченні ландшафтної структури водно-болотних угідь великої площі (дельти річок, болотні масиви, великі озера, водосховища і т.п.) поряд із загальноприйнятими, традиційними методами дослідження широке застосування отримали дистанційні методи, в т.ч. використання космічних знімків (КЗ).

Типи ландшафтних комплексів (ЛК) виділяються і класифікуються за сукупністю ознак, які впевнено дешифруються на космічних знімках. У свою чергу, тип ЛК певного рівня з достатнім ступенем вірогідності визначає основні гідрологічні, гідроморфологічні та геоекологічні характеристики досліджуваних об'єктів і таким чином непрямыми методами дозволяє виявляти процеси і явища, які не піддаються прямому дешифруванню [1, 8].

Зрозуміло, що натурні наземні дослідження дозволяють отримувати повнішу інформацію, але вони пов'язані з великими матеріальними затратами, внаслідок чого проводяться епізодично, охоплюють вибіркові ділянки і окремі ЛК, що ускладнює взаємне зіставлення і порівнянність результатів різних вимірювань. Тому використання космічних знімків для дослідження водних об'єктів представляє значний інтерес [2, 3, 4].

Розпізнавання складових природних ландшафтів багато в чому залежить від просторового розрізнення космічних знімків. При дешифруванні останніх повинна забезпечуватися максимальна ймовірність виявлення морфологічних ознак, сукупність яких дозволить розпізнати елементи ландшафту, а потім і його тип. Досвід дешифрування зображень природних ландшафтів показує, що не завжди кращий за розрізненням космічний знімок є більш інформативним і забезпечує високу ймовірність розпізнавання ландшафтних структур. Кожен

масштабний рівень – мілкий ($1:10^6$ і дрібніше), середній ($1:2 \times 10^5$) і крупний ($1:(70 \div 125) \times 10^3$) – є інформативними для ландшафтних структур певного рівня, що відрізняються не тільки за морфологією, але і за генезисом. Так, наприклад, на дрібномасштабних космічних знімках фіксуються загальні генералізовані риси геологічної будови, на середньомасштабних – розчленованість рельєфу і гідрографічна мережа, на крупномасштабних – елементи рельєфу, екологічна група рослин, точні параметри водних об'єктів та ін. [5, 6, 7].

Космічні знімки з високим просторовим розрізненням дозволяють визначити просторове розміщення і площі, зайняті вищою водною рослинністю різних екологічних груп (для гело- і плейстофітів в деяких випадках можливе навіть визначення таксономічного складу), а отже, визначити величину первинної продукції, стан нерестовищ, характеристики підстилаючих ґрунтів та ін. [9, 10].

На космічних знімках середнього розрізнення явно простежуються гідрографічна мережа, характер берегової лінії, площа як водних об'єктів різного типу, так і різнотипної рослинності (дерев'янисто-чагарникової, трав'янистої, плавневої, повітряно-водної та рослинності з плаваючим листям, сільськогосподарських угідь).

Дунай, як транскордонний водоток, має стратегічне значення для України і Румунії (держав, що знаходяться у нижній його течії) – як транспортний коридор, ресурс прісної води, об'єкт рекреації і рибальства [11]. Відомо, що в гирлову область Дунай щорічно виносить від 20 до 70 млн т зважених речовин. Близько 20% їх осідає на узбережжі, в дельтових водоймах, рукавах і протоках, сприяючи їх замуленню і викликаючи перерозподіл стоку по більш активних рукавах. Велика частина твердого стоку виноситься в море, створюючи платформу для подальшого наростання дельти. Таким чином, дельта Кілійського рукава, по якому проходить до 50% його стоку, – надзвичайно динамічне утворення. Протягом навіть одного вегетаційного сезону тут відбувається зміна окремих елементів гідрографічної мережі (наростання і розмивання кіс, замулення рукавів і т.д.) і пов'язана з цим зміна умов існування гідробіонтів [1, 10].

Виклад основного матеріалу досліджень

Метою дослідження є обґрунтування на прикладі Кілійського гирла Дунаю можливості оцінки варіабельності складових плавнево-літорального ландшафту гирлових областей річок на основі мультифрактального аналізу матеріалів космічної зйомки.

Як полігон були обрані ЛК, що сформувалися в 1985 році в Кілійській частині гирла Дунаю на ділянці з межею по кордону України і буфером по береговій лінії моря в 5 км загальною площею 60 075 га. Загальна схема розташування дослідної ділянки представлена на рис. 1.

Для проведення ретроспективного аналізу структури і площ типів ЛК Кілійського гирла Дунаю були використані дані дешифрування космічних знімків середнього просторового розрізнення КА Landsat 5,8 за 1985 та 2015 рр., а саме літні знімки кінця червня – початку вересня – час максимального розвитку угруповань макрофітів (рис. 2).

В якості дешифрувальних ознак використовувалися спектральні яскравості відбиваючих поверхонь виділених типів ЛК, отриманих на основі еталонних ділянок, завірених в ході консультації з експертом-гідробіологом, обізнаним з територією дослідження. Для класифікації КЗ Landsat застосовувався класифікатор, побудований на штучних нейронних мережах.

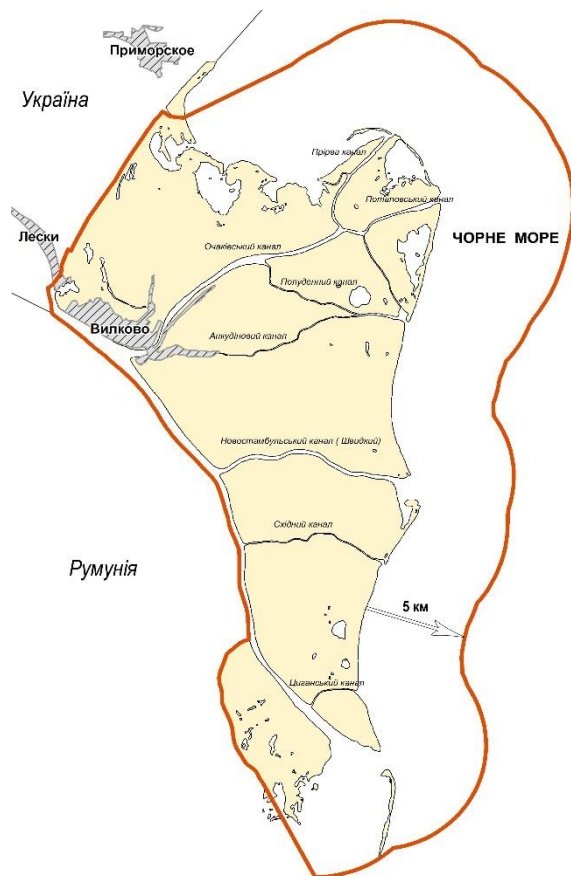


Рис. 1 – Розташування Кілійської частини гирла Дунаю

Suaeda salsa, *Puccinella gigantea*, *Salicornia prostrata* та ін.), що розташовані на ділянках прируслових гряд, переважно в верхній і середній течії рукавів, та Жебриянського приморського пасма, а також псамофітна рослинність приморських гряд та кучугур (*Salsola soda*, *Melilotus albus*, *Xanthium albinum* та ін.), рудеральна рослинність та с/х угіддя.

3. **Чиста вода** – прибережні ділянки моря, морські затоки, дельтові озера, рукави, протоки, єрики з зануреною водною рослинністю (*Stratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton pectinatus*, *P. perfoliatus* та ін.) або ж без неї.

4. **Пісок** – приморські ділянки островів, морські коси, ділянки Жебриянського приморського пасма з несформованою рослинністю, складені алювієм і позбавлені рослинності ділянки прируслових гряд.

5. **Плавнево-болотна рослинність** – рослинність центральних знижених і приморських ділянок дельтових островів, літоральна зона морських заток

В ході **дешифрування** КЗ Landsat 5,8 нами було виділено 6 типів ЛК (рис. 3, табл. 1):

1. **Дерев'янисто-чагарникова рослинність** – угруповання дерев та кущів, що ростуть на прируслових та приморських грядах, підвищених ділянках центральних частин островів дельти (*Salix triandra*, *S. alba*, *S. cinerea*, *S. fragilis*, *Populus nigra*, *Amorpha fruticosa*, *Tamarix ramosissima*, *Hippophae rhamnoides* та ін.), насадження садових культур, *Pinus pallasiana* на Жебриянському приморському пасмі.

2. **Трав'яниста рослинність** – справжні, засолені та остеповані луки з різним пасовищним навантаженням (з домінуванням *Calamagrostis epigeios*, *Agrostis gigantea*, *Festuca pratensis*, *Carex acutiformis*, *Trifolium fragiferum*, *Poa pratensis*, *Juncus maritimus*,

і дельтових озер, з домінуванням високотравних гелофітів (*Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Sparganium erectum* та ін.) і видів роду *Carex*.

6. **Угруповання плейстофітів** – мілководдя опріснених морських заток та дельтових водойм з домінуванням *Nymphaea alba*, *Potamogeton nodosus*, *P. natans*, *Trapa natans*, *Nymphoides peltata*, *Lemna minor*, *Spirodela polyrrhyza*, *Salvinia natans* та ін.

Окрім ЛК, на КЗ також були виділені антропогенностворені об'єкти дельти (населені пункти, кар'єри, дороги, дамби), що представлені на дослідній території, але їх площі не були включені в розрахунки мультифрактальної варіабельності ЛК, так як ми вивчали зміни лише природних об'єктів.

Таблиця 1 – Площі (га) ЛК Кілійської частини дельти Дунаю, виділені за КЗ Landsat 5 та 8

	ЛК	1985 р.	2015 р.
1	Дерев'янисто-чагарникова рослинність	1309,4	3325,3
2	Трав'яниста рослинність	2258,6	534,7
3	Плавнево-болотна рослинність	22030,3	23437,5
4	Угруповання плейстофітів	419,4	632,0
5	Пісок	239,4	488,3
6	Чиста вода	33535,8	31342,1



а



б

Рис. 2 – Фрагменти космічних знімків Landsat 5 та 8 Кілійської частини дельти Дунаю, використані для розпізнавання ЛК (а – станом на 30.07.1985 р.; б – станом на 20.07.2015 р.)

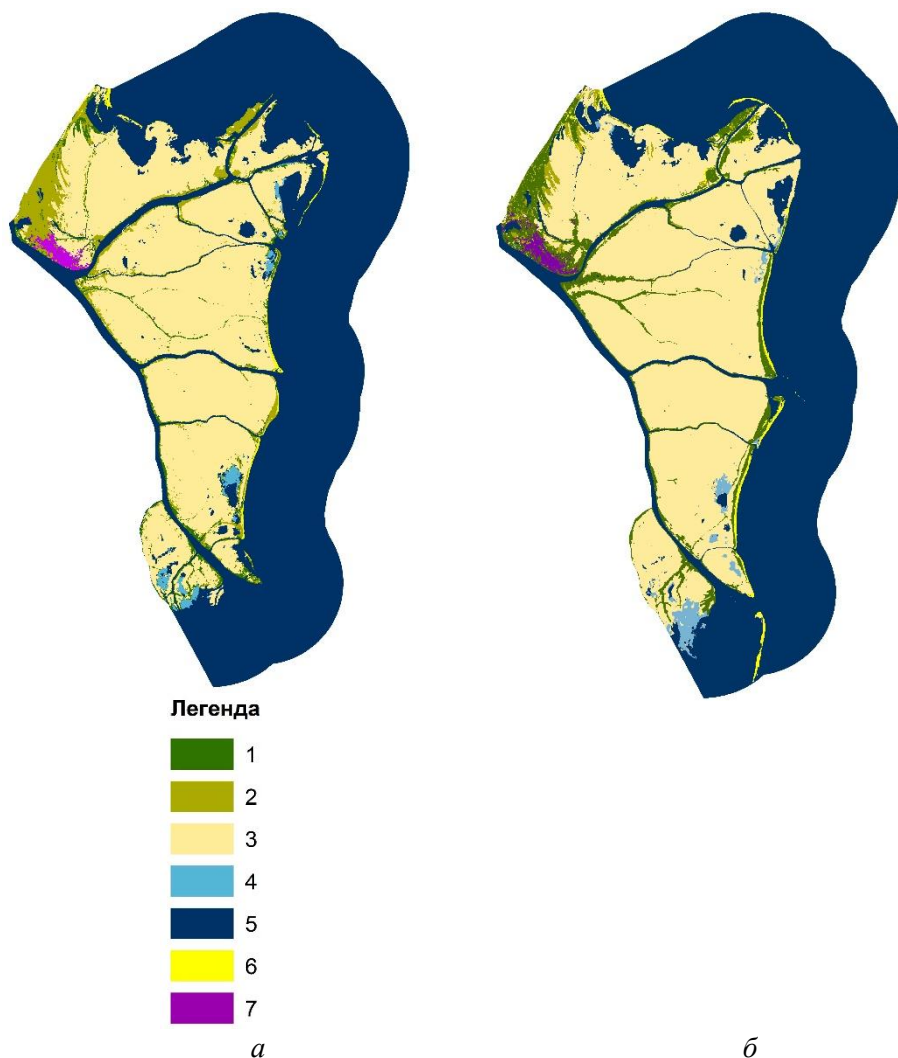


Рис. 3 – Результати піксельно-орієнтованої класифікації даних дистанційного зондування Землі середньої просторової розрізненості (КЗ Landsat) методом штучних нейронних мереж для виділення ЛК (*a* – карта станом на 30.07.1985 р.; *б* – карта станом на 20.07.2015 р.)

Умовні позначення: 1 – дерев'янисто-чагарникова рослинність; 2 – трав'яниста рослинність; 3 – плавнево-болотна рослинність; 4 – угруповання плейстофітів; 5 – пісок; 6 – чиста вода; 7 – антропогенностворені об'єкти дельти

Так як гирлові області річок являють собою самоподібну ієрархічну, тобто фрактальну структуру, що складається з повторюваних на різних структурних рівнях складових природного ландшафту, то застосування мультифрактального аналізу для дослідження варіабельності складових дельтових територій є обґрунтованим [4].

Для характеристики відхилення розподілу деякої величини від рівномірного використовується формула узагальненої ентропії Рені [12], що заснована на моментах q -го порядку ймовірностей p_i :

$$S_q = \frac{1}{1-q} \log \sum_{i=1}^N p_i^q \quad (1)$$

$$p_i = \frac{N_i}{N}, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (2)$$

де N – загальний обсяг вибірки (загальна кількість складових на вибраній площі); N_i – кількість i -того типу складових у вибраній площі N ; n – кількість всіх типів складових, число яких залежить від N ; p_i – імовірність приналежності даного типу складової у вибірці до i -того типу; q – степінь моменту (статистичної суми), яка приймає цілочисельні значення в діапазоні – $q_{\max} < q < q_{\max}, q_{\max} > 0$.

Для визначення варіабельності різноманітних ландшафтних складових гирла вводиться узагальнена статистична сума Z_q (моменти q -го порядку ймовірностей p_i), яка дозволяє відрізнити нерівномірні розподілення складових від рівномірних

$$Z_q(N, q) = \sum_{i=1}^n p_i^q \propto N^{\tau(q)} \quad (3)$$

У виразі (3) показано, що основна умова статистичної самоподібності (мультифракталу) є міра, яка пропорційна розміру вибірки в степені $\tau(q)$ або лінійній залежності в логарифмічному масштабі: $\log[Z_q(N, q)] = \tau(q) \log N$,

$$\tau(q) = \frac{\log[Z_q(N, q)]}{\log N} = \frac{\log \sum_{i=1}^n p_i^q}{\log N} \quad (4)$$

де N – обсяг генеральної вибірки.

Для визначення варіабельності різноманітних складових і оцінки ступеня відхилення їх від рівномірного розподілу по типах скористаємося узагальненими мультифрактальними розмірностями:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{1-q} \quad \text{при } q \neq 1. \quad (5)$$

Функція D_q , визначена виразами (4) і (5), показує, наскільки неоднорідним є розподіл АЛК за типами і наскільки цей розподіл відрізняється від рівномірного. Функція D_q носить назву *спектру узагальнених розмірностей Рені мультифракталу*. При $q \rightarrow +\infty$ основний внесок у суму відносних значимостей вносять домінуючі типи ЛК, що характеризуються найбільшими значеннями p_i , а при $q \rightarrow -\infty$ основний внесок роблять складові суми з малими значеннями p_i , тобто рідкісні типи складових ландшафту або ЛК. На практиці обмежуються розглядом не більше десяти значень цілих чисел q , що й прийнято в даній роботі.

Якщо розподіл складових по типах неоднаковий, то фрактал є неоднорідним, тобто мультифракталом, і для цього опису використовують

спектр узагальнених фрактальних розмірностей D_q . Значення $D(q)$ інваріантне до розміру вибірки (площі, масштабу) [13].

Існування мультифрактальної структури гирлових областей річок встановлюється перевіркою виконання 2 необхідних умов розподілу за типами: 1) степенева залежність росту компонентів мультифрактальної міри μ_q від розміру вибірки N (рис. 4); 2) незростаючий вигляд функції спектра узагальнених розмірностей $D(q)$.

Оцінка варіабельності ЛК на основі космічної інформації та наземних даних виконувалась на основі індексів варіабельності – узагальнених розмірностей Рені як інтегральних оцінок. У розглянутому аспекті індекси дозволяють оцінити динаміку мінливості ЛК.

За співвідношенням (2–4) визначаються розподіл ймовірностей p_i , статистичної суми Z_q та значень $\tau(q)$ за типами складових за весь досліджуваний період.

На рис. 5а показано нелінійний характер залежності $\tau(q)$, отриманої при дослідженні розподілу ЛК по типах на прикладі Кілійського гирла Дунаю. Нелінійний характер залежностей $\tau(q)$ і їх відхилення від лінійного показує значний розмах варіабельності у розподілі складових по типах.

Значення індексів варіабельності D_q , $q \in [-7, 7]$, обчислені за співвідношенням (5), зведені в табл. 2.

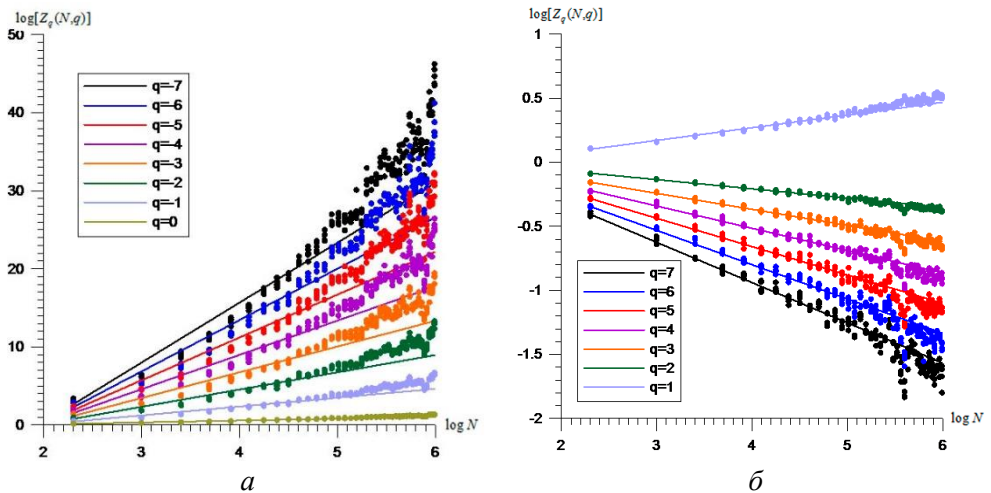


Рис. 4 – Залежність компонентів статистичної суми Z_q розподілу складових по типах від розміру вибірки N в білогарифмічній системі координат за даними за 2015 р., для значень $q \in [-7, 0]$ (4a) і $q \in [1, 7]$ (4б)

Таблиця 2 – Індеси варіабельності D_q розподілу ЛК

Дані ДЗЗ	-7	-6	-5	...	-2	-1	0	1	2	...	5	6	7
1985	0,178	0,175	0,170	...	0,140	0,115	0,070	0,027	0,015	...	0,010	0,009	0,009
2015	0,156	0,154	0,151	...	0,130	0,110	0,070	0,028	0,016	...	0,010	0,010	0,010

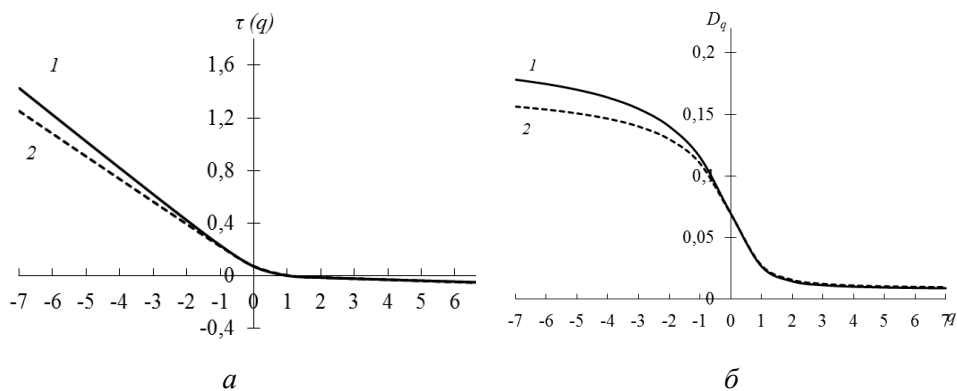


Рис. 5 – Оцінка варіабельності за матеріалами дешифрування даних ДЗЗ (1 – 1985 р.; 2 – 2015 р.) (а – графіки залежності показника степені τ від q ; б – графіки функцій D_q , $q \in [-7, 7]$)

На рис. 5б наведено результати обчислення динаміки інтегральних оцінок варіабельності ЛК за період 1985–2015 рр.

З розгляду графіку (рис. 5) можна зробити висновок, що максимальна варіабельність за аналізований період часу проявляється при від'ємних значеннях q індексів D_q . Найбільш чутливими до екологічних процесів є нечисленні типи складових, а саме виділені за матеріалами ДЗЗ угруповання плейстофітів та піщані коси.

За матеріалами космічних знімків в досліджуваній період можна простежити зростання майже вдвічі площ дерев'янисто-чагарникової рослинності та зменшення площ трав'янистої рослинності, що може бути пов'язане із сукцесіями, що йдуть в екосистемах плавнево-літорального ландшафту. Про подальше наростання дельти свідчить збільшення площі піску вдвічі. Використання мультифракталів допомогло математично довести зміну ландшафтної структури в бік збільшення частки дрібних складових.

Висновок

Розглянутий приклад використання індексів варіабельності на фактичних даних ЛК підтверджує легітимність методів дослідження варіабельності ЛК гірлових областей рік за індексами варіабельності. Такий підхід при використанні інтегральних інформативних показників ЛК відкриває нові можливості для виявлення загальних тенденцій змін, що відбуваються в плавнево-літоральному ландшафті гірлових ділянок річок, і може скласти основу їх комплексного моніторингу на якісно новому рівні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гейны С., Дубына Д.В., Сытник К.М. и др. Макрофиты – индикаторы изменений природной среды. – Киев: Наукова думка, 1993. – 433 с.
2. Федоровський О.Д., Суханов К.Ю., Якимчук В.Г., Дьяченко Т.М. Методичні аспекти класифікації аквальної ландшафтів в зоні шельфу / Глобальна система наблюдений Чорного моря. – Севастополь: МГИ НАН України. – 2000. – С. 24–29.

3. Федоровский А.Д., Даргейко Л.Ф., Дьяченко Т.Н. К вопросу оценки экологического состояния аквально-наземных ЛК на основе системного подхода // Доп. НАН України. – 2000. – №5. – С. 129–131.
4. Даргейко Л.Ф., Дьяченко Т.М., Федоровский О.Д., Якимчук В.Г. Системний підхід при оцінці екологічного стану ландшафтних аквальних комплексів // Проблеми ландшафтного різноманіття України: Збірн. наук. праць. К. – 2000. – С. 257–261.
5. Востокова Е. А., Сущенко В. А., Шевченко Л. А. Экологическое картографирование на основе космической информации. – М.: Недра, 1988. – 221 с.
6. Николаев В. А. Космическое ландшафтоведение. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. – 81 с.
7. Ревзон А.Л. Космическая фотосъемка в транспортном строительстве. – М: Транспорт, 1993. – 272 с.
8. Григорьев А.А. Космическая индикация ландшафтов Земли. Л.: Издат. Лен. университета, 1975. – 165 с.
9. Дьяченко Т.Н., Федоровский А.Д., Суханов К.Ю. К вопросу оценки экологического состояния Килийской дельты Дуная // Диагноз состояния среды прибрежных и шельфовых зон Черного моря: Сб. науч. тр. – Севастополь, 1996. – С. 127–132.
10. Клоков В. М. Ценологическая характеристика водной растительности Килийской дельты Дуная // Высшие водные и прибрежноводные растения: Тез. докл. I Всесоюзн. конф., Борок, 1977, 7–9 сент. – К.: Наукова думка, 1977. – С. 39–43.
11. Черой О.І. Перерозподіл стоку по рукавах дельти Дунаю в умовах існування судноплавних каналів / О.І. Черой // Український гідрометеорологічний журнал. – 2013. – № 13. – С. 176–182. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Uggj_2013_13_24
12. Renyi A. Probability theory. – Amsterdam: North-Holland, 1970. – 670 p.
13. Артюшенко М.В., Подгородецкая Л.В., Зуб Л.Н., Федоровский А.Д. Мультифрактальный анализ биоразнообразия и ценотической структуры сообщества растений по данным дистанционного зондирования // Доп. НАН України. – 2011. – № 9. – С. 132–141.

Стаття надійшла до редакції 13.05.2017