

---

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.02.085>

УДК 504:528

**О.В. Томченко<sup>1</sup>, А.В. Хижняк<sup>1</sup>,  
Т.М. Дьяченко<sup>2</sup>, О.Д. Федоровський<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі  
Інституту геологічних наук НАН України”, Київ

<sup>2</sup> Інститут гідробіології НАН України, Київ

E-mail: AVSokolovska@i.ua

## **Оцінка варіабельності ландшафтних складових гірлових областей річок (на прикладі Ананькіного кута)**

*Представлено членом-кореспондентом НАН України О.Д. Федоровським*

*На прикладі водойми Кілійської дельти Дунаю — Ананькіного кута обґрунтовано можливість оцінки варіабельності ландшафтних складових гірлових областей річок на основі мультифрактального аналізу матеріалів космічної зйомки. Підхід, що базується на індексах варіабельності, з використанням інтегральних інформативних показників аквально-ландшафтних комплексів, відкриває нові можливості для виявлення загальних тенденцій змін, що відбуваються у водних екосистемах і може скласти основу їх комплексного моніторингу на якісно новому рівні.*

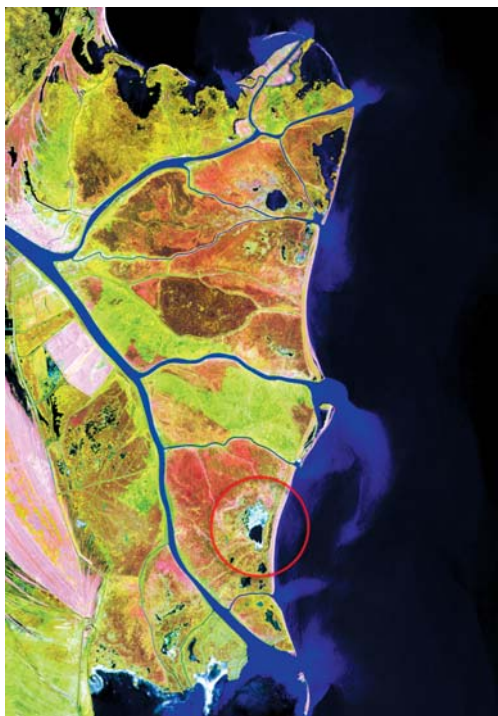
**Ключові слова:** *аквальні ландшафтні комплекси, космічна інформація, мультифрактальний аналіз, Дунай, Ананькін кут.*

Ріка Дунай має стратегічне водогосподарське та природоохоронне значення для України і Румунії — як транспортний коридор, ресурс прісної води, об’єкт рекреації, рибальства, білатеральний румунсько-український біосферний резерват “Дельта Дунаю”. По Дунаю і його Кілійському рукаву проходить державний кордон між Україною і Румунією, тому проблемам дельти Дунаю приділяється увага урядів обох країн [1].

Українська частина дельти Дунаю (дельта Кілійського рукава) — надзвичайно динамічне утворення. Протягом навіть одного вегетаційного сезону тут відбувається зміна окремих елементів гідрографічної мережі (наростання і розмивання морських кіс, замулення, заростання внутрішньодельтових водойм і рукавів, зміна морфометричних характеристик морських заток тощо) і пов’язаних з цим умов існування гідробіонтів, що призводить до флуктуації та сукцесії в їх розвитку. Основним компонентом біоти більшості екосистем мілководних акваторій дельти є вища водна рослинність, яка не тільки відіграє важливу роль в їх функціонуванні [2], а й маркує елементарні ландшафтні одиниці, що їх складають.

© О.В. Томченко, А.В. Хижняк, Т.М. Дьяченко, О.Д. Федоровський, 2018

ISSN 1025-6415. Допов. Нац. акад. наук Укр. 2018. № 2



**Рис. 1.** Розташування озера Ананькін кут (фрагмент космічного знімку Sentinel станом на 18.06.2016)

Мета даної роботи — показати на прикладі однієї з ділянок дельти Дунаю — Ананькіного кута (рис. 1), можливість оцінити варіабельність ландшафтних складових гирлових областей річок на основі мультифрактального аналізу матеріалів космічної зйомки.

**Матеріали та методи.** У 1960-ті роки Ананькін кут безпосередньо з'єднувався з морем (рис. 2, а). Приблизно половина його акваторії заростала вищою водною рослинністю. Центральне плесо відрізнялося хорошим водообміном і було вільне від заростей. На прилеглих до моря ділянках збереглися “переживаючі” ценози, характерні для солонувато-водних заток. До 1990-х років, у результаті подовження коси Східної, Ананькін кут практично повністю відокремився від моря і перетворився на внутрішньодельтову водойму (див. рис. 2, б). Водообмін тут значно погіршився. Для його поліпшення в північній частині затоки був проритий канал, що з'єднує Ананькін кут з рукавом Східний. Відділення від моря та погіршення водообміну, а отже пониження солоності, накопичення мулів у донних відкладах, зменшення глибини, стало головною причиною зміни рослинності в затоці.

Сильне замулення і практично повна відсутність водообміну в південній частині водойми призвели до масового розвитку куширу зануреного з нитчастими водоростями, що свідчить про переважаючі процеси заболочування.

Крім детального геоботанічного вивчення [3], рослинність озера досліджувалася ландшафтним методом, суть якого полягає у виділенні ландшафтних одиниць у результаті одночасного дешифрування ознак абіотичного середовища (водообмін, вираженість алювіального і ґрунтоутворювального процесів, солоність тощо) і їх геоботанічної представленості. Тобто виділеним ландшафтним одиницям (біотопам) відповідають комбінації рослинних угруповань на рівні субасоціацій в обсязі школи Браун-Бланке, які їх маркують.

**Таблиця 1.** Площі АЛК Ананькіного кута, виділені в ході наземних спостережень, га

Тип АЛК	1960-ті рр.	1990-ті рр.
I	39,2	96,4
II	39,1	93,2
III	5,3	21,6
IV	21,5	15,2
Загалом	105,1	226,4

**Таблиця 2.** Площі ландшафтних комплексів Ананькіного кута, виділені на КЗ Pleiades 1B

Тип ландшафтного комплексу	Площа, га
1 — суцільна плаваюча рослинність	92,23
2 — розріджена плаваюча рослинність	25,18
3 — чиста вода	51,43
4 — повітряно-водна та плавнева рослинність	30,59
5 — дерев'янисто-чагарникова рослинність	2,85

Так, на основі гідроботанічних спостережень Ананькіного кута в 1960-ті та 1990-ті рр. було виділено 11 і 8 ділянок відповідно, об'єднаних у чотири типи аквально-ландшафтних комплексів (АЛК) [4–6]:

I АЛК — ділянки з інтенсивною седиментацією й перевідкладенням наносів. Розповсюджені, головним чином, у нових затоках. Домінують ценози *Nymphoidetum peltatae* з *Trapa natans*, *Elodeetum canadensis*, *Najadetum marinae* та *Ceratophylletum demersi*, s/ass. *najadosum*.

II АЛК — ділянки внутрішніх водойм і старих заток зі слабким водообміном й автохтонним мулонакопиченням. Переважають лататтеві ценози. Поряд з ними поширені угруповання *Ceratophylletum demersi*, *Typhetum angustifoliae*, *Phragmitetum communis* і *Sparganietum erecti*.

III АЛК — ізольовані ділянки заток і внутрішньодельтові водойми з гіперакумуляцією органічної речовини. Тут переважають угруповання *Ceratophyllo-Hydrocharitetum*, *Hydroharito-Stratiotetum aloides*, широко поширена синузія вільноплаваючих видів.

IV АЛК — найбільш підвищені ділянки водойм із чорними детритними мулами й болотними ґрунтами, представлені угрупованнями очерету й рогозу з водною рослинністю й болотним різнотрав'ям.

Результати розрахунку площ АЛК Ананькіного кута за наземними спостереженнями наведені в табл. 1.

Для аналізу сучасної структури Ананькіного кута було використано космічний знімок (КЗ) високого просторового розрізнення Pleiades 1В станом на 05.08.2013 (рис. 3, а). Але на відміну від наземних досліджень, за результатами яких було виділено чотири типи АЛК з різними набором і співвідношенням ценотичних одиниць рослинності, на КЗ нами було розпізнано більш крупні рослинні одиниці, які виділялися за типами рослинності або біоморфами та маркували більш високий рівень ландшафтних комплексів (біотопів).

Як дешифрувальні ознаки використовувалися спектральні яскравості відбиваючих поверхонь виділених типів рослинних одиниць, отриманих на основі еталонних ділянок, завірених експертом гідробіологом, обізнаним з територією дослідження. Віднесення тієї чи іншої досліджуваної ділянки до конкретного типу рослинних одиниць здійснювалося шляхом визначення домінуючої біоморфи серед рослин цієї ділянки. Для класифікації об'єктів, представлених на КЗ Pleiades 1В, застосовувалася об'єкт-орієнтована класифікація методом опорних векторів. У ході дешифрування КЗ Pleiades 1В нами виділено п'ять типів ландшафтних комплексів (табл. 2, рис. 3, б):

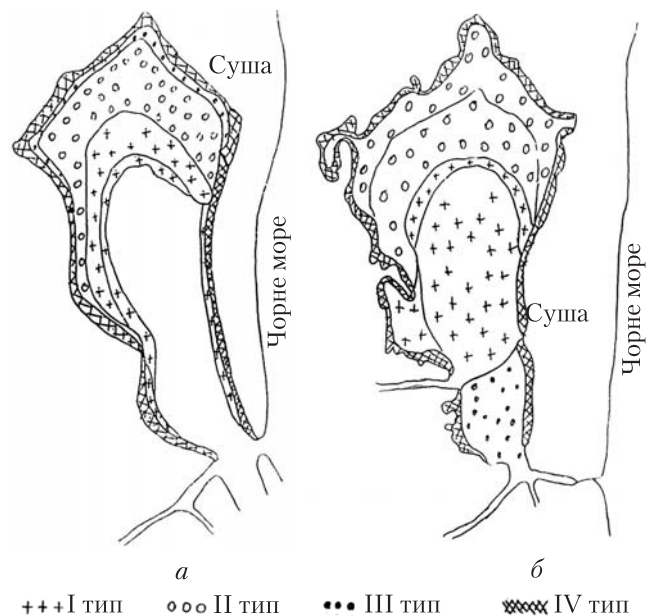


Рис. 2. Порівняльна карта водно-рослинних ландшафтних комплексів (ВРЛК) озера Ананькін кут 1960 р. (а) і 1990 р. (б)

**1. Суцільна плаваюча рослинність** — угруповання вкорінених плейстофітів з домінуванням *Nymphaea alba* і *Trapa natans*, які розвиваються на ділянках зі слабким водообміном на чорних рідких та грубодетритних мулах. У другій половині вегетаційного сезону тут з'являються вільноплаваючі види: *Salvinia natans*, *Spirodela polyrrhiza*, *Lemna minor*.

**2. Чиста вода** — як правило центральні, більш глибокі ділянки Ананькіного кута, з поліпшеним водообміном, піском чи сірим мулом у донних відкладах, які вільні від заростей або ж зайняті розрідженими заростями гідатофітів з домінуванням *Ceratophyllum demersum* та *Elodea Canadensis*.

**3. Розріджена плаваюча рослинність** — розріджені угруповання *Trapa natans* з *Ceratophyllum demersum* в нижньому ярусі, екотонна група, які розташовані по краю заростей плейстофітів та на межі між ценозами латаття з водяним горіхом і чистими заростями останнього.

**4. Повітряно-водна та плавнева рослинність** — периферійні, більш мілководні ділянки кута із заростями високотравних повітряно-водних рослин (*Typha angustifolia*, *Phragmites australis*) та ділянки плавнів з домінуванням очерету, видів роду *Carex* та болотного різнотрав'я.

**5. Дерев'янисто-чагарникова рослинність** — угруповання підвищених ділянок плавнів з вираженим процесом ґрунтоутворювання і включенням кущів та дерев (види роду *Salix*, *Populus*, *Alnus*).

Одним із системних методів, які використовуються для дослідження варіабельності складових дельтових територій, є фрактальний аналіз [7].

Для характеристики відхилення розподілу деякої величини від рівномірного використовується формула узагальненої ентропії Реньї [8], що заснована на моментах  $q$ -го порядку ймовірностей  $p_i$ :

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

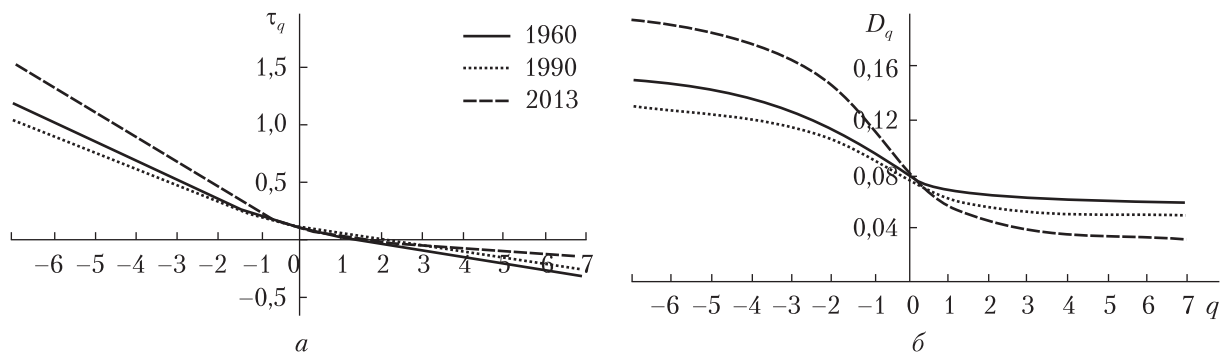
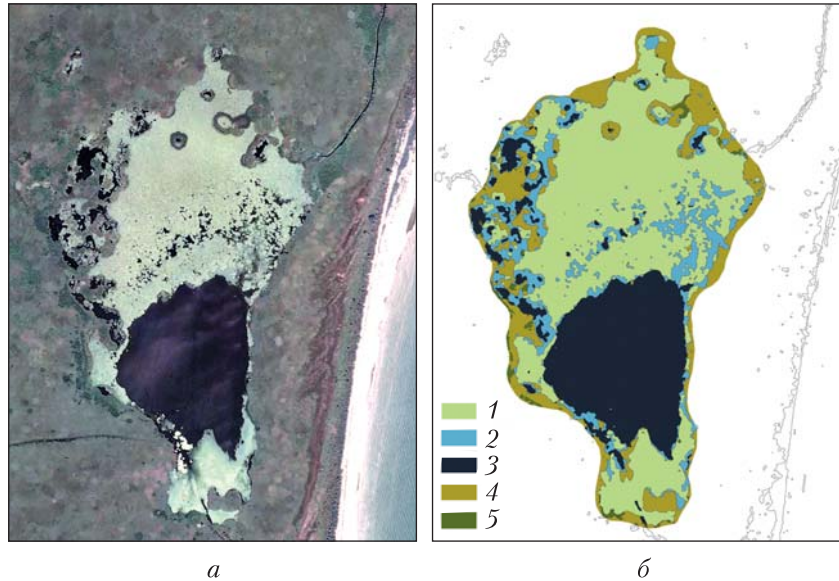
$$p_i = \frac{N_i}{N}, \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1, \quad (2)$$

де  $N$  — загальний обсяг вибірки (загальна кількість складових на вибраній площі);  $N_i$  — кількість  $i$ -го типу складових у вибраній площі —  $N$ ;  $n$  — кількість у всіх типів складових, число яких залежить від  $N$ ;  $p_i$  — ймовірність належності даного типу складової у вибірці до  $i$ -го типу;  $q$  — ступінь моменту (статистичної суми), який набуває цілочислових значень у 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 дає можливість відрізнити нерівномірні розподіли складових від рівномірних

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

**Рис. 3.** Результати об'єкт-орієнтованої класифікації даних ДЗЗ високої просторової розрізненості (Pleiades 1В) для виділення ландшафтних комплексів біоморфного рівня станом на 05.08.2013 (*a* – фрагмент космічного знімку Pleiades; *b* – карта ландшафтних комплексів, отримана в результаті дешифрування космознімку). Умовні позначення: 1 – суцільна плаваюча рослинність; 2 – розріджена плаваюча рослинність; 3 – чиста вода з зануреною рослинністю; 4 – повітряно-водна та плавнева рослинність; 5 – дерев'янисто-чагарникова рослинність



**Рис. 4.** Оцінка варіабельності за матеріалами дешифрування даних ДЗЗ та наземних спостережень: *a* – графіки залежності показника степеня  $\tau$  від  $q$ ; *b* – графіки функцій  $D_q$ ,  $q \in [-7, 7]$

У виразі (3) показано, що основна умова статистичної самоподібності (мультифрактала) є міра, яка пропорційна розміру вибірки в степені  $\tau(q)$  (в логарифмічному масштабі:  $\log[Z_q(N, q)] = \tau(q) \log N$ ). Розрахуємо степені  $\tau(q)$  методом найменших квадратів:

$$\tau(q) = \frac{\ln Z(N, q)}{\ln N} = \frac{\ln \sum_{i=1}^n p_i^q}{\ln N}. \quad (4)$$

Введемо узагальнену мультифрактальну розмірність для визначення варіабельності різноманітних складових і оцінки степеня відхилення їх від рівномірного розподілу за типами, яка розраховується таким чином:

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

Функція  $D_q$ , визначена виразом (5), показує, наскільки неоднорідним є розподіл АЛК за типами і наскільки цей розподіл відрізняється від рівномірного. Функція  $D_q$  називається *спектром узагальнених розмірностей Реньї мультифрактала*. При  $q \rightarrow +\infty$  основний внесок у суму відносних значущостей роблять домінуючі типи АЛК, що характеризуються найбільшими значеннями  $p_r$ , а при  $q \rightarrow -\infty$  – складові суми з малими значеннями  $p_r$ , тобто рідкісні типи складових ландшафту або АЛК. На практиці обмежуються розглядом не більше десяти значень цілих чисел  $q$ , що й прийнято в даній роботі.

Якщо розподіл складових за типами 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) [9, 10].

**Результати та їх обговорення.** Оцінка варіабельності ландшафтних комплексів гірлової частини Дунаю на основі космічної інформації дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та наземних даних по трьох зрізах (1960 р., 1990 р., 2013 р.) (див. табл. 1, 2) виконувалася на основі індексів варіабельності – узагальнених розмірностей Реньї, як інтегральних оцінок. У розглянутому аспекті індекси дають можливість оцінити динаміку зростання Ананькіного кута як складового елемента Кілійської частини гірла Дунаю.

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

На рис. 4, а показано нелінійний характер залежності  $\tau(q)$ , побудованої за результатами дослідження розподілу ландшафтних складових за типами на прикладі Ананькіного кута. Нелінійний характер залежностей  $\tau(q)$  і їх відхилення від лінійного показує значний розмах варіабельності в розподілі складових за типами.

Значення індексів варіабельності  $D_q$ ,  $q \in [-7, 7]$ , обчислені за співвідношенням (5). На рис. 4 наведено результати обчислення динаміки інтегральних оцінок варіабельності ландшафтних складових Ананькіного кута за період 1960–2013 рр. При цьому площі АЛК та ландшафтних комплексів більш високого порядку не можна порівнювати напряму між собою, а от визначати за ними варіабельність можна з однаковою достовірністю. Як впливає з розгляду графіків (див. рис. 4), максимальна варіабельність за аналізований період проявляється у разі від’ємних значень  $q$  індексів  $D_q$ . Найбільш чутливими до екологічних процесів є численні типи складових, а саме виділені за матеріалами ДЗЗ ландшафтні комплекси плаваючої рослинності або ж за результатами наземних спостережень АЛК IV типу.

Згідно з матеріалами ДЗЗ, на сучасному етапі відбувається подальше заростання Ананькіного кута, а саме збільшення площі суцільно плаваючої рослинності на місці відкритої водної поверхні із зануреною рослинністю, що в подальшому може призвести до повного заростання озера та поступового перетворення його на плавні. За допомогою мультифрактальних методів вдалося математично відобразити зміну ландшафтної структури в часі і виявити, які складові найбільш мінливі.

Таким чином, розглянутий приклад використання індексів варіабельності на фактичних даних дешифрування ДЗЗ та наземних спостережень підтверджує легітимність методів дослідження ландшафтних складових гірлових областей рік за індексами варіабельності. Такий підхід з використанням інтегральних інформативних показників АЛК відкриває нові можливості для виявлення загальних тенденцій змін, що відбуваються у водних екосистемах, і може скласти основу їх комплексного моніторингу на якісно новому рівні.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Черой О.І. Перерозподіл стоку по рукавах дельти Дунаю в умовах існування судноплавних каналів. *Укр. гідрометеорол. журн.* 2013. № 13. С. 176–182.
2. Дубына Д.В., Стойко С.М., Сытник К.М. и др. Макрофиты — индикаторы изменений природной среды. Киев: Наук. думка, 1993. 433 с.
3. Дяченко Т.М. Формування вищої водяної рослинності дунайської гирлової області за сучасних екологічних умов: Автореф. дис. ... канд. біол. наук / Інститут гідробіології НАН України. Київ, 1995.
4. Клоков В.М. Водная растительность и флористические особенности Килийской дельты Дуная: Автореф. дис. ... канд. биол. наук / Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. Москва, 1978.
5. Федоровський О.Д., Суханов К.Ю., Якимчук В.Г., Дьяченко Т.М. Методичні аспекти класифікації аквально-наземних ландшафтів в зоні шельфу. *Глобальная система наблюдений Черного моря*. Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. С. 24–29.
6. Федоровский А.Д., Даргейко Л.Ф., Дьяченко Т.Н. К вопросу оценки экологического состояния аквально-наземных ЛК на основе системного подхода. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2000. № 5. С. 129–131.
7. Даргейко Л.Ф., Дьяченко Т.М., Федоровський О.Д., Якимчук В.Г. Системний підхід при оцінці екологічного стану ландшафтних аквально-наземних комплексів. *Проблеми ландшафтного різноманіття України*: Зб. наук. праць. Київ, 2000. С. 257–261.
8. Бабич В. Н., Колясников В. А. Фрактальные структуры в планировке и застройке города. *Акад. вестн. УралНИИпроект РААСН*. 2009. № 2. С. 45–47.
9. Renyi A. Probability theory. Amsterdam: North-Holland, 1970. 670 p.
10. Артюшенко М.В., Зуб Л.Н., Подгородецкая Л.В., Федоровский А.Д. Мультифрактальный анализ биоразнообразия и ценотической структуры сообщества растений по данным дистанционного зондирования. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2011. № 9. С. 132–141.

Надійшло до редакції 08.09.2017

REFERENCES

1. Cheroy, O. I. (2013). Redistribution of drainage at sleeves of the Danube Delta in the conditions existence of navigable channels. *Ukrainskyi Hidrometeorolohichnyi Zhurn.*, No. 13, pp. 176-182 (in Ukrainian).
2. Dubyna, D. V., Stoiko, S. M., Sytnik, K. M. et al. (1993). Macrophytes are indicators of changes in the natural environment. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
3. Diachenko, T. M. (1995). Formation of the highest water vegetation of the Danube Mare region under the current ecological conditions. (Extended abstract of Candidate thesis). Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine (in Ukrainian).
4. Klokov, V. M. (1978). Water vegetation and floristic features of the Kiliya delta of the Danube. (Extended abstract of Candidate thesis). Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation (in Russian).
5. Fedorovsky, O. D., Sukhanov, K. Yu., Yakymchuk, V. G. & Dyachenko, T. M. (2000). Methodical aspects of the classification of aquatic landscapes in the shelf area. *Global Observing System of the Black Sea* (pp. 24-29). Sevastopol: MGI of the NAS of Ukraine (in Ukrainian).
6. Fedorovsky, A. D., Dargeyko, L. F. & Dyachenko, T. M. (2000). On the issue of assessing the ecological state of aquatic-terrestrial LC based on the system approach. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, No. 5, pp. 129-131 (in Russian).
7. Dargoiko, L. F., Dyachenko, T. M., Fedorovsky, O. D. & Yakymchuk, V. G. (2000). System approach in assessing the ecological state of landscape aquatic systems. *Problems of Landscape Diversity of Ukraine* (pp. 257-261). Kiev (in Ukrainian).
8. Babich, V. N. & Kolyasnikov, V. A. (2009). Fractal structures in the planning and building of the city. *Acad. Vestnik UralNIIProekt RAASN*, No. 2, pp. 45-47 (in Russian).
9. Renyi, A. (1970). Probability theory. Amsterdam: North-Holland.
10. Artiushenko, M. V., Zub, L. N., Pidgorodetska, L. V. & Fedorovsky, A. D. (2011). Multifractal analysis of the biodiversity and the cenotic structure of a community of plants by remote sensing data. *Dopov. Nac. akad. nauk. Ukr.*, No. 9, pp. 132-141 (in Russian).

Received 08.09.2017

О.В. Томченко<sup>1</sup>, А.В. Хижняк<sup>1</sup>, Т.Н. Дьяченко<sup>2</sup>, А.Д. Федоровский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГУ “Научный центр аэрокосмических исследований Земли  
Института геологических наук НАН Украины”, Киев

<sup>2</sup> Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

E-mail: AVSokolovska@i.ua

#### ОЦЕНКА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ЛАНДШАФТНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ УСТЬЕВЫХ ОБЛАСТЕЙ РЕК (НА ПРИМЕРЕ АНАНЬКИНОГО КУТА)

На примере водоема Килийской дельты Дуная — Ананькиного кута обоснована возможность оценки вариабельности ландшафтных составляющих устьевых областей рек на основе мультифрактального анализа материалов космической съемки. Подход, основанный на индексах вариабельности, при использовании интегральных информативных показателей аквальных ландшафтных комплексов, открывает новые возможности для выявления общих тенденций изменений, происходящих в водных экосистемах и может составить основу их комплексного мониторинга на качественно новом уровне.

**Ключевые слова:** аквальные ландшафтные комплексы, космическая информация, мультифрактальный анализ, Дунай, Ананькин кут.

O.V. Tomchenko<sup>1</sup>, A.V. Khyzhniak<sup>1</sup>, T. M. Dyachenko<sup>2</sup>, O.D. Fedorovsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth  
of the Institute of Geological Science NAS of Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: AVSokolovska@i.ua

#### ASSESSMENT OF THE VARIABILITY OF LANDSCAPE COMPONENTS OF RIVER'S MOUTH AREAS (BY EXAMPLE OF THE ANANKIN LAKE)

The possibility of estimating the variability of landscape components of river's mouth areas by the example of the Kiliya delta of the Danube — Anankin Lake, by using the multifractal analysis of remotely sensed materials is substantiated. This approach is based on the indices of variability, by using integral informative indicators of aquatic landscape complexes. It opens up new opportunities for revealing the general tendencies of changes occurring in aquatic ecosystems and can form the basis of their integrated monitoring on a qualitatively new level.

**Keywords:** aquatic landscape complexes, remote sensing, multifractal analysis, Danube, Anankin Lake.