



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 13 • № 1 • 2017 С. 54 – 63

УДК 528.88 : 528.8.04 : 574.52 : 504.45.058 : 502.65

Використання аерокосмічних методів та методів обробки даних дистанційного зондування Землі для екологічного моніторингу Каховського водосховища

В.Ю. Беленок*, Д.І. Деркач, Н.В. Руль

Національний авіаційний університет, 03058, м. Київ, пр. Космонавта Комарова, 1

У статті виконано аналіз екологічного стану Каховського водосховища з використанням даних дистанційного зондування Землі та методів їх цифрової обробки, зокрема, методу синтезу мультиспектрального зображення (Composite), створення мозаїки знімків, радіометричної та атмосферної корекції, спектральних перетворень значень пікселів космічних знімків та зональної статистики ArcGIS. Дослідження проведено на основі космічних знімків Landsat за 1977–2017 рр. Розраховані на територію водосховища значення температури та вегетаційних індексів, а також візуальний аналіз мультиспектрального зображення дозволили виявити ділянки Каховського водосховища з найвищими значеннями температури та інтенсивним поширенням синьо-зелених водоростей.

Ключові слова: дистанційне зондування; обробка даних дистанційного зондування; евтрофікація водойм; екологічний моніторинг; Каховське водосховище.

1. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Створення на Дніпрі каскаду водосховищ зумовило виникнення багатьох екологічних проблем, зокрема, підтоплення прилеглих до водосховищ земель, абразії берегів, «цвітіння води» тощо. Зміни водного режиму негативно позначилися на кисневому режимі водосховищ, що досить часто призводить до заморів риби [1, 2].

Однією з основних екологічних проблем, що виникає у водосховищі, є евтрофікація («цвітіння» води у водосховищі). Це явище характерне для більшості водосховищ Дніпровського каскаду і, зокрема, Каховського. На «цвітіння» води впливає температура повітря, наявність у воді біогенних речовин, негативно впливають гумусові речовини. Улітку домінують синьо-зелені водорості [3].

У роботі [4] зазначено, що процеси евтрофікації в каскаді Дніпровських водосховищ набули останнім часом загрозливих масштабів. Прямим наслідком надмірної евтрофікації можна вважати так зване «цвітіння» води — інтенсивний розвиток мікробіоти, що відбувається за певних сприятливих умов і має вибухоподібний характер. Разом з тим зростає сапробність водойми, тобто ступінь насиченості води продуктами розкладу органічних речовин.

Вивчення цих проблем викликає певні труднощі, зокрема, існує складність проведення відповідних досліджень у польових умовах. Традиційні методи вивчення стану водосховищ не дають змоги отримати просторову картину явищ і процесів, що в них відбуваються. Іншим недоліком традиційних методів є їхня велика вартість. Далеко не завжди знаходяться кошти для з'ясування стану дамб, розмиву берегів. Те саме стосується виявлення зон з надмірним «цвітінням» води [3].

Метою даної роботи є проведення аналізу екологічного стану одного з найбільших водосховищ Дніпра — Каховського водосховища — із залученням методів обробки даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) на основі супутникових знімків Landsat місій 1–5, 7–8 за 1977–2017 рр. з приділенням особливої уваги останньому десятиріччю роботи водосховища (періоду 2007–2017 рр.).

Методика дослідження базується на способах обробки мультиспектральних знімків супутників Landsat серій 1–5, 7–8 Національної геологічної служби США (USGS) [5]. Обробку знімків було виконано у спеціалізованому програмному забезпеченні ГІС і ДЗЗ: ArcGIS 10, ERDAS IMAGINE 2014 (Hexagon Geospatial), IMAGINE Photogrammetry, ATCOR 3 for ERDAS IMAGINE 2014. Для виділення території Каховського водосховища було виконано автономну класифікацію космоснімка з подальшим експортом класифікованих пікселів растра, що належать водному об'єкту в формат share-файлу, а для подальшого дослідження «цвітіння» води в водосховищі проведено аналіз з використанням інформації теплогового каналу супутників Landsat для обчислення температури поверхні водосховища та за допомогою розрахунків різниці вегетаційного індексу NDVI.

* Беленок Вадим Юрійович; ✉ belenok.vadim@gmail.com

2. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

В останні десятиріччя у вивченні екологічних проблем біосфери все більше значення надається аерокосмічним методам дослідження. Специфіка застосування космічних зйомок і отримання за їх допомогою нової інформації зумовлена їх оглядовістю, можливістю вивчення поверхні Землі на різних рівнях генералізації.

Достатньо обґрунтовані відомості про стан водних об'єктів, зокрема великих водосховищ, дають змогу підвищити ефективність управлінських рішень щодо контролю та поліпшення екологічного стану водосховищ. Для цього необхідно мати достовірну, своєчасну і повну інформацію про основні морфометричні характеристики, параметри навколишнього природного середовища і, власне, стан досліджуваної водойми. Більшість з цих даних, зокрема температуру водної поверхні водосховища, площу водного дзеркала, можна отримати, застосовуючи матеріали ДЗЗ.

Значний внесок у розвиток методів обробки і тематичної інтерпретації космічних знімків зробили такі вчені, як Бутенко О.С., Березіна С.І., Козлова А.О., Красовський Г.Я., Лялько В.І., Попов М.О., Станкевич С.А. та інші. Видано численні наукові монографії, в яких висвітлено можливості застосування технологій ГС та ДЗЗ для здійснення моніторингу водних об'єктів, зокрема, Красовського Г.Я., Анпілової Є.С., Довгого С.О., Радчук В.В. Дослідженням змін, що відбуваються у водних екосистемах, за матеріалами ДЗЗ присвячені публікації Томченко О.В., Стародубцева В.М., Загородьої С.А., Толстохатка В.А. та інших.

Зазначимо, що в монографії [6] ефективність методів ДЗЗ у вирішенні задачі визначення зон «цвітіння» води оцінюється як 0,71.

3. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

3.1. Фізико-географічний опис об'єкта дослідження

В якості об'єкта дослідження вибрано Каховське водосховище, розташоване в Дніпропетровській, Запорізькій та Херсонській областях України. За часом створення Каховський гідровузол був другим після ДніпроГЕСу. Каховська ГЕС є останньою, шостою сходинкою у каскаді гідроелектростанцій, який є на Дніпрі. Чинником, що обмежує роботу усього каскаду, є невелика пропускна здатність ГЕС — всього 2600 м³/с. Каховське водосховище було утворено в 1955–56 рр., заповнення водосховища відбувалося протягом 1955–1958 рр. Воно має найбільший повний об'єм серед Дніпровських водосховищ — 18,18 км³ та другий (після Кременчуцького) корисний об'єм — 6,78 км³. Площа водної поверхні водосховища — 2155 км² є другою в каскаді. Довжина водосховища становить 230 км, максимальна ширина — до 25,0 км, середня — 9,3 км. Середня глибина водосховища при нормальному підпірному рівні (найвищий підпірний рівень поблизу водопідпірної споруди, перевищення якого в нормальних умовах експлуатації не допускається) становить 8,5 м; максимальна — 24,0 м. Розрахунковий напір — 16,5 м. Мінералізація води 253–433 мг/дм³. Воно здійснює річне регулювання стоку [7]. На водах Каховського водосховища працює найпотужніша атомна електростанція Європи — Запорізька АЕС.

3.2. Теоретичні основи застосування космічних знімків при дослідженні водосховища

Методи обробки космічних знімків для моніторингу процесів евтрофування водойм зазвичай базуються на аналізі варіацій коефіцієнта дифузного відбиття світла поверхневими й підповерхневими шарами води при збільшенні в них концентрації зважених речовин і, в першу чергу, фітопланктону. Збільшення концентрації фітопланктону спричиняє зростання коефіцієнта дифузного відбиття світла внаслідок підвищення розсіювання світла назад на мікроводоростях. З іншого боку, цей процес супроводжується збільшенням вмісту у фітопланктоні різних пігментів, які інтенсивно поглинають світло в специфічних інтервалах, що приводить до зменшення дифузного відбиття світла в певних зонах спектра. Залежність показника поглинання світла від концентрації фітопланктону проявляється тільки в певних спектральних зонах, специфічних для різних пігментів фітопланктону. Найбільш впливовим є поглинання світла хлорофілом-А. Максимум поглинання цим пігментом припадає на спектральний інтервал 670–690 нм. Чутливою до цього ефекту є дистанційна зйомка з відносно високою спектральною роздільною здатністю [2, 8].

У той же час при космічній зйомці із широкими спектральними каналами ефект зменшення дифузного відбиття світла внаслідок поглинання пігментами фітопланктону може маскуватися збільшенням дифузного відбиття світла, обумовленого зворотним розсіюванням на частках фітопланктону. При дистанційній зйомці в ближньому ІЧ-діапазоні вихідний світловий потік формується в дуже тонкому приповерхневому шарі води. Тому у випадку зважених часток неорганічного походження, для яких характерне збільшення концентрації із глибиною, дифузне відбиття світла є дуже низьким. У той же час при інтенсивному «цвітінні» вод спостерігається висока концентрація фітопланктону в тонкому приповерхневому шарі води, що визначає високі коефіцієнти відбиття для ділянок акваторії, де спостерігається інтенсивне «цвітіння» [2, 9].

Описані особливості зонального розподілу дифузно відбитого світла на ділянках інтенсивного «цвітіння» води обумовлюють ефективність використання матеріалів багатозональної космічної зйомки для їхнього картографування. Для цього досить використовувати хоча б два спектральних канали зйомки, одним із яких має бути ближній ІЧ-діапазон. У цьому випадку ефективним є використання каналів зйомки 600–700 нм і 800–900 нм [2].

Додатковою дешифрувальною ознакою при ідентифікації «цвітіння» вод може служити текстура зображення. Для ділянок інтенсивного «цвітіння» найчастіше характерна специфічна нитковидна текстура. Використання цієї ознаки особливо ефективно при роботі із зображеннями невеликих по площі водойм, коли необхідне застосування космічних знімків високого розрізнення [2, 10].

3.3. Екологічний моніторинг Каховського водосховища за мультиспектральними космічними знімками Landsat

У даній роботі як інформаційні продукти використовувались супутникові знімки, отримані системами знімання Landsat місії 1–5 (сенсор MSS), 4–5 (TM), 7 (ETM+) і 8 (OLI, TIRS). Технічні характеристики сенсорів вказаних супутників наведено в табл. 1 і табл. 2 [11, 12]. Усі сцени відносяться до вегетаційного періоду (з травня по вересень) і характеризуються мінімальними значеннями хмарності.

Знімки були завантажені з сайту Національної геологічної служби США (USGS) [5] (дані сенсорів TM, ETM+, OLI і TIRS — рівня Landsat Collection 1 Level-1).

Таблиця 1. Технічні характеристики супутників Landsat: сенсори MSS 1–5, TM 4–5

	Landsat 1–3	Landsat 4–5	Довжина хвилі, мкм	Розрізненність, м
Landsat 1–5 Multispectral Scanner (MSS)	Канал 4 – Green	Канал 1 – Green	0,5–0,6	60*
	Канал 5 – Red	Канал 2 – Red	0,6–0,7	60*
	Канал 6 – Near Infrared (NIR)	Канал 3 – Near Infrared (NIR)	0,7–0,8	60*
	Канал 7 – Near Infrared (NIR)	Канал 4 – Near Infrared (NIR)	0,8–1,1	60*
	Канал 4 – Green	Канал 1 – Green	0,5–0,6	60*
Landsat 4–5 Thematic Mapper (TM)	Канал 1 – Blue		0,45–0,52	30
	Канал 2 – Green		0,52–0,60	30
	Канал 3 – Red		0,63–0,69	30
	Канал 4 – Near Infrared (NIR)		0,76–0,90	30
	Канал 5 – Shortwave Infrared (SWIR) 1		1,55–1,75	30
	Канал 6 – Thermal		10,40–12,50	120** (30)
	Канал 7 – Shortwave Infrared (SWIR) 2		2,08–2,35	30

*вихідний розмір пікселя MSS складав 79 × 57 м, системи обробки даних перераховують його до 60 м;

**вихідний розмір пікселя TM Band 6 складав 120 м, системи обробки даних перераховують його до 30 м.

Таблиця 2. Технічні характеристики супутників Landsat 7 і 8: сенсори ETM+ і OLI, TIRS 8

	Спектральні канали	Довжина хвилі, мкм	Розрізненність, м
Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Канал 1 – Blue	0,45–0,52	30
	Канал 2 – Green	0,52–0,60	30
	Канал 3 – Red	0,63–0,69	30
	Канал 4 – Near Infrared (NIR)	0,77–0,90	30
	Канал 5 – Shortwave Infrared (SWIR) 1	1,55–1,75	30
	Канал 6 – Thermal	10,40–12,50	60* (30)
	Канал 7 – Shortwave Infrared (SWIR) 2	2,09–2,35	30
	Канал 8 – Panchromatic	0,52–0,90	15
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Канал 1 – Ultra Blue (coastal/aerosol)	0,435 – 0,451	30
	Канал 2 – Blue	0,452–0,512	30
	Канал 3 – Green	0,533–0,590	30
	Канал 4 – Red	0,636–0,673	30
	Канал 5 – Near Infrared (NIR)	0,851–0,879	30
	Канал 6 – Shortwave Infrared (SWIR) 1	1,566–1,651	30
	Канал 7 – Shortwave Infrared (SWIR) 2	2,107–2,294	30
	Канал 8 – Panchromatic	0,503–0,676	15
	Канал 9 – Cirrus	1,363–1,384	30
	Канал 10 – Thermal Infrared (TIRS) 1	10,60–11,19	100** (30)
	Канал 11 – Thermal Infrared (TIRS) 2	11,50–12,51	100** (30)

*у 6-му каналі сенсора ETM+ вихідна розрізненність складала 60 м, системи обробки даних перераховують його до 30 м;

**розрізненність у каналах сенсора TIRS складає 100 м, системи обробки даних перераховують його до 30 м.

Початкові цифрові значення знімка («сирі значення» або DN — Digital Numbers), які є його спектральною яскравістю, визначають за числом і положенням рівнів квантування в радіометричному діапазоні. Радіометрична корекція полягає у варіюванні значень яскравості пікселів, причиною якого є не сам об'єкт або скановане зображення. Таке варіювання визначається збоєм або несправністю детекторів, впливом рельєфу і атмосферними ефектами [13]. Тому попередньо було виконано радіометричну та атмосферну корекцію знімків. Радіометрична корекція полягає у перерахунку безрозмірних «сирих» значень DN у фізичні величини: значення спектральної густини енергетичної яскравості (spectral radiance) або у значення коефіцієнтів відбиття (reflectance). У даній роботі було обчислено величини спектральної густини енергетичної яскравості L_λ . Для знімків Landsat сенсорів MSS, TM і ETM+ це виконується за формулою [12, 14, 15]

$$L_\lambda = \frac{L_{\max,\lambda} - L_{\min,\lambda}}{Q_{\text{cal,max}} - Q_{\text{cal,min}}} (Q_{\text{cal}} - Q_{\text{cal,min}}) + L_{\min,\lambda},$$

де L_λ — спектральна густина енергетичної яскравості, що надійшла на сенсор (Spectral radiance at the sensor's aperture), $[L_\lambda] = [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})]$;

$L_{\max,\lambda}$ — значення спектральної густини енергетичної яскравості, що надійшло на сенсор, що масштабується до $Q_{\text{cal,max}}$, $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})]$;

$L_{\min,\lambda}$ — значення спектральної густини енергетичної яскравості, що надійшло на сенсор, що масштабується до $Q_{\text{cal,min}}$, $[\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})]$;

Q_{cal} — квантоване «сире» значення пікселя (Quantized calibrated pixel value), тобто DN;

$Q_{\text{cal,max}}$ — максимальне квантоване значення пікселя, що відповідає значенню $L_{\max,\lambda}$;

$Q_{\text{cal,min}}$ — мінімальне квантоване значення пікселя, що відповідає значенню $L_{\min,\lambda}$.

Для знімків Landsat сенсорів OLI і TIRS перерахунок виконується за простішою формулою [16, 17]

$$L_\lambda = \text{Mult}_{\text{band}} \cdot Q_{\text{cal}} + \text{Add}_{\text{band}},$$

де $\text{Mult}_{\text{band}}$ — мультиплікативний коефіцієнт масштабування для певного каналу знімка (RADIANCE_MULT_BAND у файлі метаданих); Add_{band} — адитивний коефіцієнт масштабування для певного каналу знімка (RADIANCE_ADD_BAND у файлі метаданих).

Після виконання радіометричної корекції було виконано атмосферну корекцію (Atmospheric Correction) та корекцію за рельєф (Topographic Correction) з використанням цифрової моделі рельєфу SRTM, отриманої з ресурсу [5], за допомогою програмного модуля ATCOR 3 for ERDAS IMAGINE 2014 [18].

Для виявлення на водосховищі ділянок «цвітіння» води використано нормалізований різницевий вегетативний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), що обчислюється за формулою [13, 19]

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}},$$

де NIR і RED — значення спектральної густини енергетичної яскравості в ближньому інфрачервоному та червоному каналах, відповідно. $\text{NDVI} = [-1; +1]$. Для водних об'єктів NDVI набуває негативних значень; для ґрунтів, сухої рослинності наближається до нуля; максимальних значень набуває для рослинності, що вегетує, і проміжних — для різних станів рослинного покриву. Значення індексу при відсутності рослинності або дуже зрідженого травостою/стеблостою наближається до нуля або має від'ємні величини, характеризуючи голий ґрунт [13].

На рис. 1 показано зображення території Каховського водосховища за 1977 р.

З рис. 1 бачимо, що додатних значень NDVI на території водосховища немає (зелені кольори на території водосховища відсутні), а середнє значення $\text{NDVI}_{\text{ср},1977} = -0,058$ (обчислено за допомогою функцій зональної статистики ArcGIS). Це свідчить про відсутність водоростей (що також можна бачити і на мультиспектральному знімку).

На рис. 2 і рис. 3 показано зображення території Каховського водосховища на сценах Landsat 5 TM за 26.08.1987 та за 09.09.1998.

Знімки супутника Landsat, починаючи з отриманих сенсором TM, можуть бути використані для обчислення температури сцени знімання за формулою [16, 3, 14]:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)},$$

де T — значення яскравісної температури, що надійшло на сенсор (Effective at-sensor brightness temperature [14]); K_1 і K_2 — калібрувальні константи; L_λ — значення спектральної густини енергетичної яскравості для теплового каналу. Причому температуру за цією формулою отримують у абсолютній шкалі.

У роботі [2] зазначено, що при високій температурі повітря спостерігається інтенсивне «цвітіння» води і виникає скупчення водоростей, а їх подальше розмноження має негативні наслідки для санітарно-біологічного стану якості води, внаслідок чого виникає дефіцит кисню в нижніх горизонтах води та в нічні години. Утворюються різноманітні органічні та неорганічні речовини, в тому числі і

токсичні. У роботі [3] зазначено, що на «цвітіння» води впливає температура повітря, причому автори дійшли висновку, що не тільки температура води впливає на «цвітіння», а й «цвітіння» впливає на температуру води; це пояснюється тим, що вода з більшою концентрацією водоростей краще поглинає сонячне випромінювання, іншими словами, має менше альбедо.

Отже, у даній роботі було обчислено значення температури (з перерахунком на шкалу Цельсія) для сцен Landsat за 2007–2017 рр. Для цих же сцен було знайдено значення індексу NDVI. Значення цих двох величин, усереднені для пікселів, що належать території водосховища, наведено на рис. 4 і рис. 5.

З рис. 4 і 5 видно, що максимум у значеннях температури та NDVI за останнє десятиліття прийшовся на 2010 р. Це збігається з результатами, отриманими в роботі [3], де зазначається, що у 2010 р. на багатьох гідрологічних постах, розташованих на Дніпровському каскаді, зафіксовано максимальні температури, які досі не спостерігались. Покажемо зміну температури на поверхні Каховського водосховища

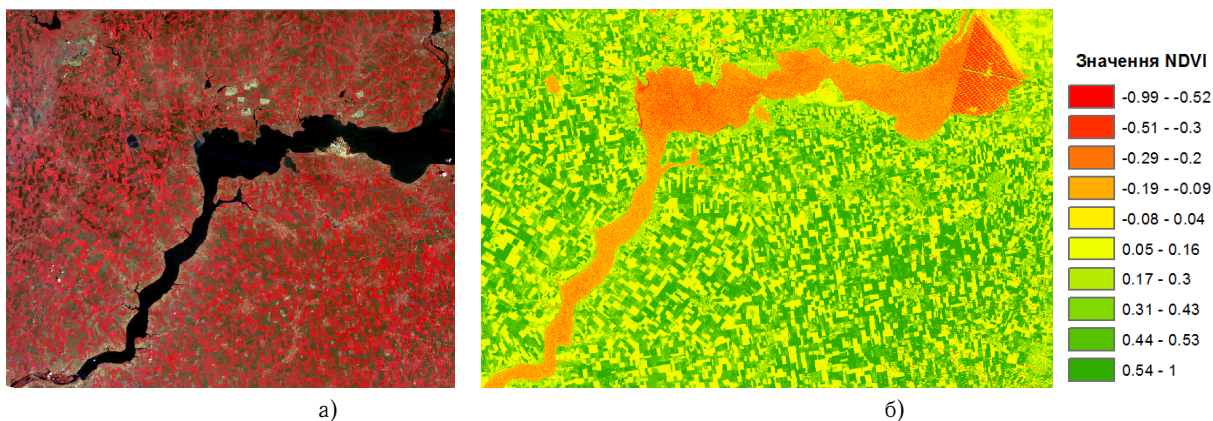


Рис. 1. Сцена Landsat 2 за травень 1977 р.: а — мультиспектральний знімок (R, G, B = NIR, Red, Green); б — значення індексу NDVI

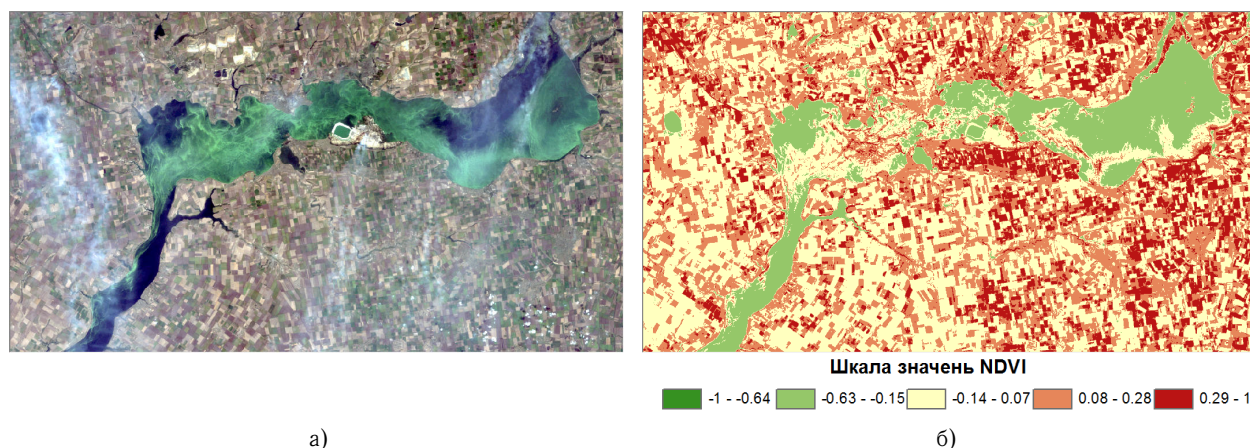


Рис. 2. Сцена Landsat 5 TM за 26.08.1987: а — зображення у натуральних кольорах; б — зображення у значеннях NDVI

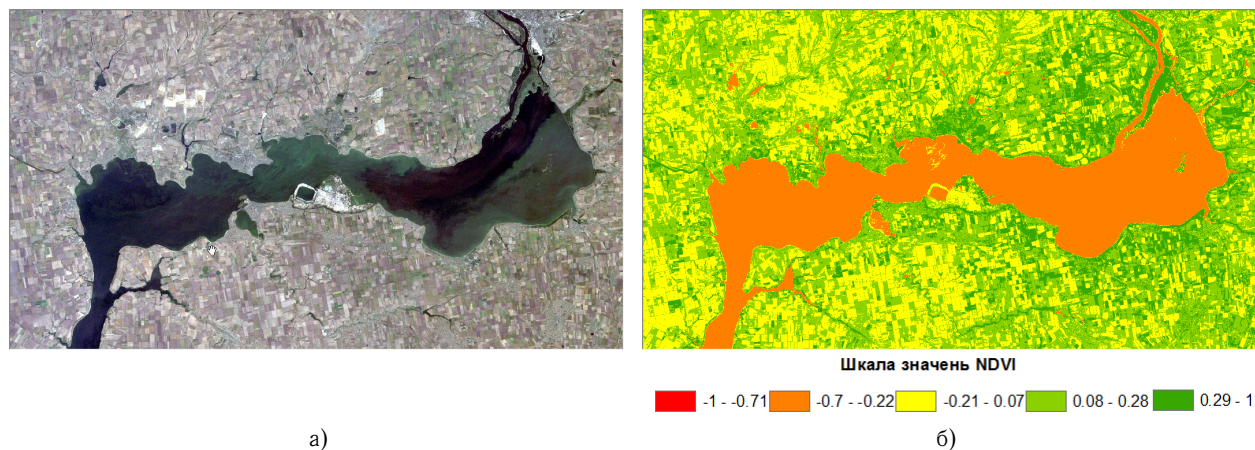


Рис. 3. Сцена Landsat 5 TM за 09.09.1998: а — зображення у натуральних кольорах; б — зображення у значеннях NDVI

за серпень–вересень 2010 р. на знімках (рис. 6).

Аналіз екологічного стану водосховища є також можливим із використанням нормалізованого диференціального альгоіндексу NDAI, який дозволяє оцінювати ступінь розвиненості водної флори [19]. Даний індекс був успішно застосований для екологічної оцінки Матирського [20] та Воронезького водосховищ [21]. Альгоіндекс NDAI обчислюється через значення спектральних яскравостей за формулою [20, 21]

$$\text{NDAI} = \frac{\text{Green} + 2 \cdot \text{NIR} - \text{Blue} - \text{Red}}{\text{Green} + 2 \cdot \text{NIR} + \text{Blue} + \text{Red}} + 0,5.$$

Значення індексу не залежать від атмосферних перешкод і впливу спектра відбиття самої води та нормовані таким чином, що значення менше 0,5 відповідають чистій воді, близько 0 — слабкому розмноженню водоростей, а більше 0,5 — бурхливому «цвітінню» води [19, 21].

Проілюструємо динаміку розвитку водоростей на поверхні Каховського водосховища у серпні 2010 р. за допомогою рис. 7 і рис. 8.

Аналізуючи рис. 7 і 8, бачимо, що на початку серпня 2010 р. «цвітіння» води було незначним і мало місце, здебільше, на краях водосховища. Проте до 25 серпня відбулося значне поширення водоростей, особливо це помітно у центральній частині Каховського водосховища, про що свідчать додатні значення NDVI і значення NDAI більше 0,5 у цій ділянці водойми. Також дана ділянка характеризується найвищим значенням температури у водосховищі, що видно з рис. 6,в.

4. ВИСНОВКИ

1. Каховське водосховище характеризується достатньо високими показниками сумарної сонячної радіації, що сприяє його заростанню вищою водною рослинністю, особливо в мілководній верхній частині, і «цвітінню» води, обумовленому бурхливим розмноженням синьо-зелених водоростей на значній частині акваторії (до 80–95%). Пік цього процесу зазвичай припадає на липень–серпень [22].

2. Космічні знімки середньої розрізненності Landsat, що знаходяться у вільному доступі, архів яких налічує знімки за 70-ті роки ХХ ст. і продовжує поповнюватись актуальними даними, дозволяють

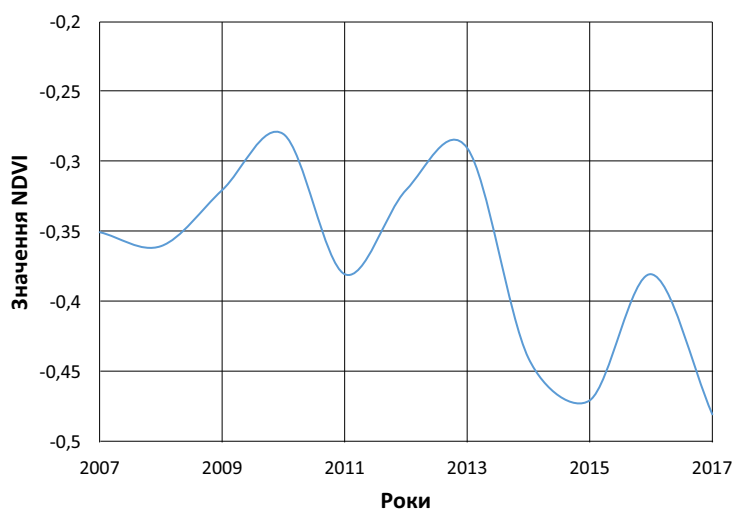


Рис. 4. Графік зміни значення вегетаційного індексу NDVI за 2007–2017 рр.

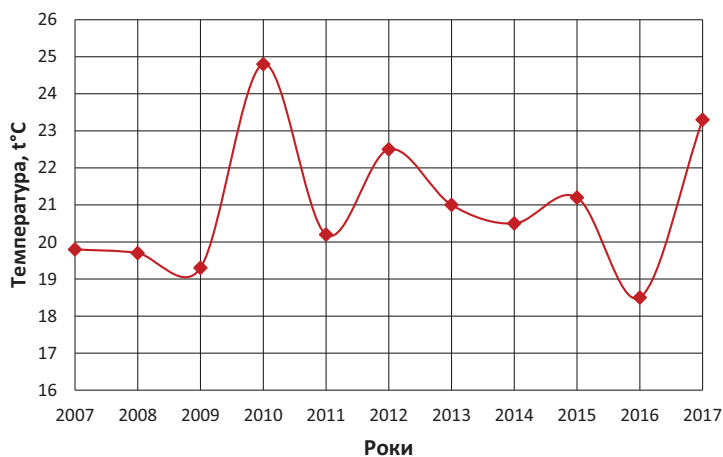


Рис. 5. Розподіл температури по роках за 2007–2017 рр., t° C

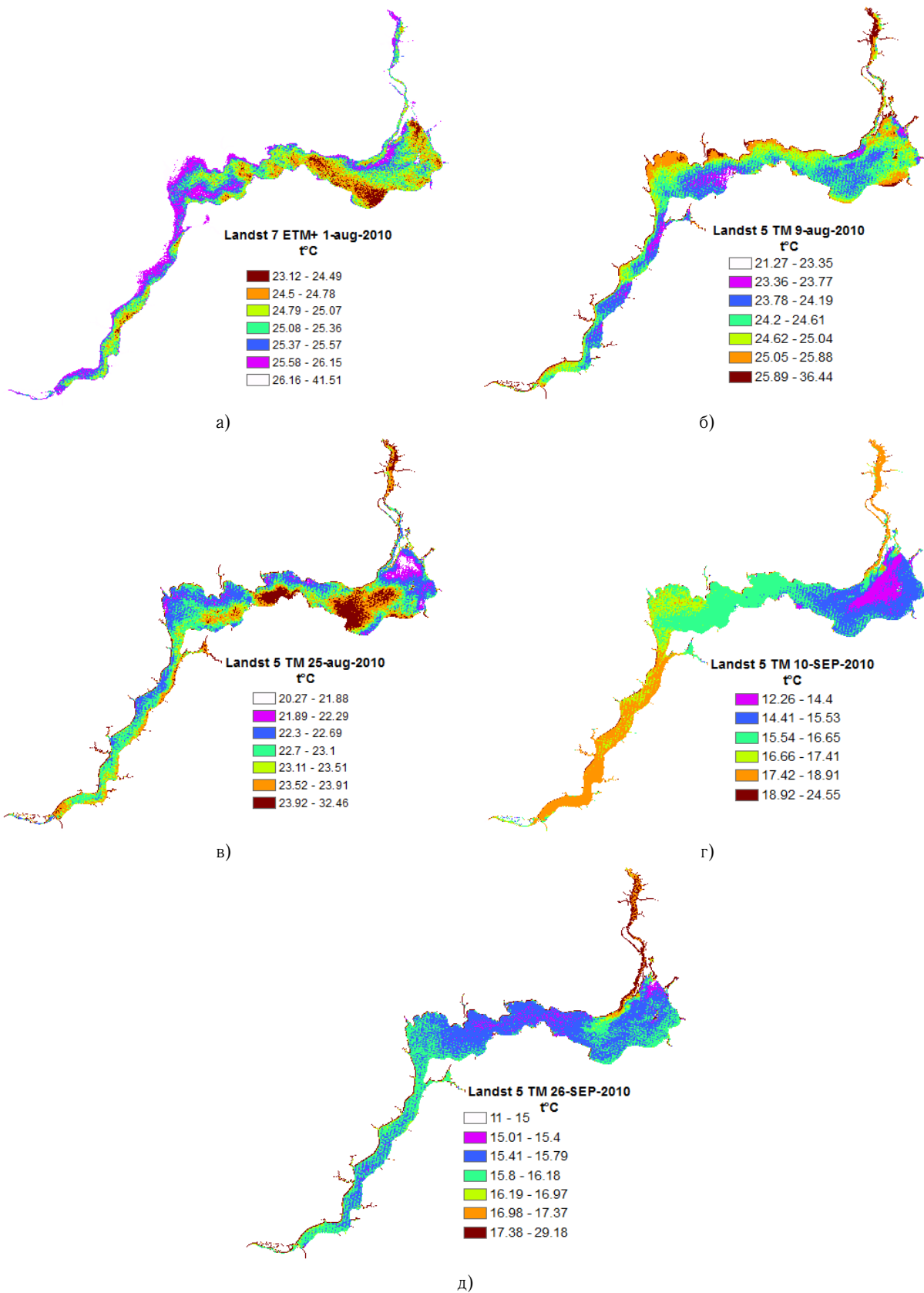
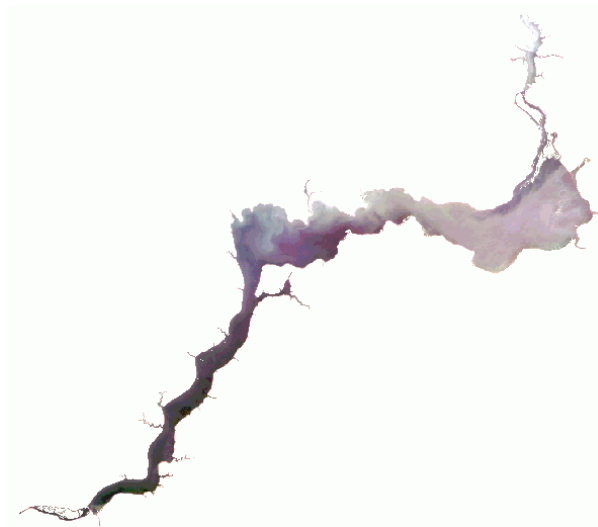
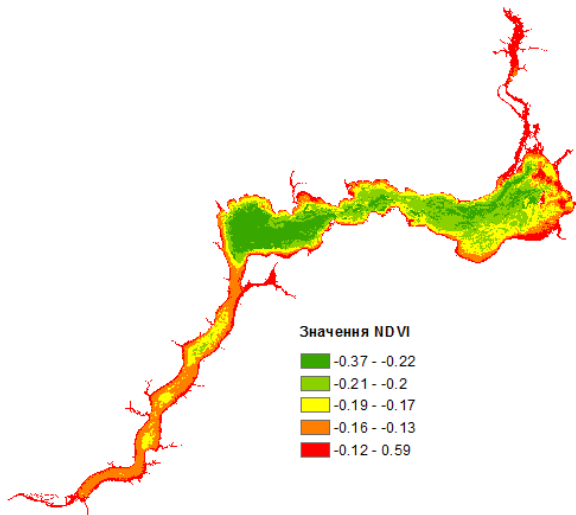


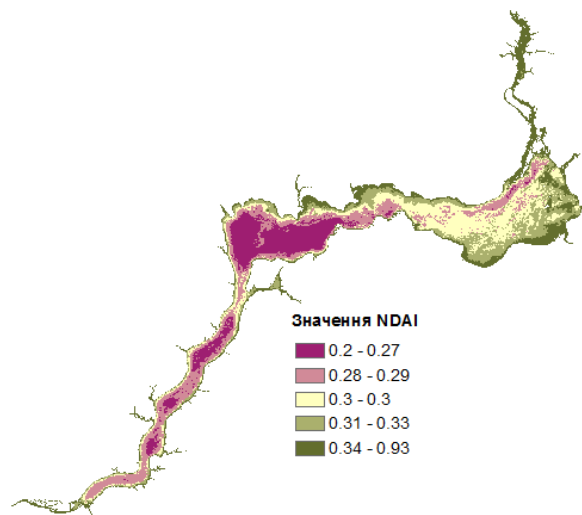
Рис. 6. Розподіл температури на поверхні Каховського водосховища у серпні–вересні 2010 р., обчислений по знімках Landsat



a)

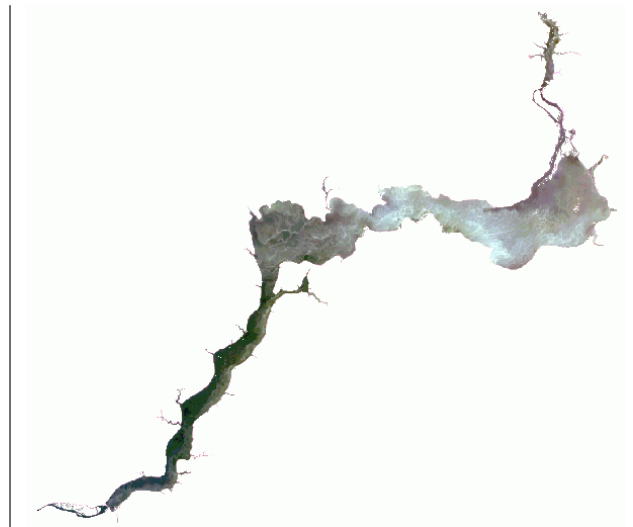


б)

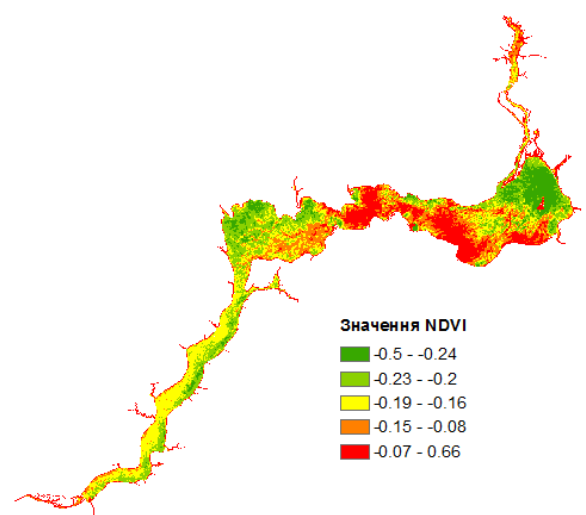


в)

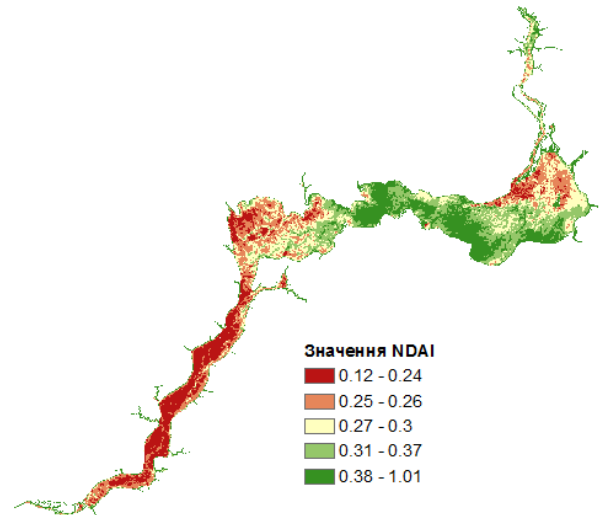
Рис. 7. Візуалізація процесу «цвітіння» води за 09.08.2010: *a* — мультиспектральний знімок (зображення у натуральних кольорах); *б* — значення індексу NDVI; *в* — значення індексу NDAI



a)



б)



в)

Рис. 8. Візуалізація процесу «цвітіння» води за 25.08.2010: *a* — мультиспектральний знімок (зображення у натуральних кольорах); *б* — значення індексу NDVI; *в* — значення індексу NDAI

отримувати оперативну та достовірну інформацію для моніторингу стану об'єктів ландшафту, зокрема, екологічного стану водосховищ.

3. На основі застосування методів ДЗЗ та цифрової обробки даних ДЗЗ, зокрема, операцій синтезу мультиспектрального зображення (Composite), його наступної радіометричної та атмосферної корекції, зональної статистики та спектральних перетворень пікселів каналів знімання побудовано зображення території Каховського водосховища у значеннях яскравісної температури та нормалізованих різницеєвих вегетаційних індексів NDVI та NDAI. Аналіз температурного режиму Каховського водосховища показав, що найбільше значення температури було зафіксовано в 2010 р., та дозволив виділити на космічних знімках ділянки водосховища з найбільшим значенням температури. На цих же ділянках за допомогою розрахованих значень вегетаційних індексів виявлено найбільшу активність процесів «цвітіння» води. Це підтверджує ефективність і доцільність використання методів обробки даних ДЗЗ для виконання екологічного моніторингу та оцінки стану великих за розмірами водних об'єктів, зокрема водосховищ.

4. Застосування методів ДЗЗ та цифрової обробки космічних знімків дозволяють підвищити оперативність екологічного моніторингу водосховищ, виявити обсяг, динаміку та напрямок поширення процесів «цвітіння» води, а їх результати можуть бути корисними для органів місцевої влади та служб, що здійснюють нагляд за станом навколишнього середовища.

1. Лялько В.И., Сахацкий А.И., Ходоровский А.Я. Экологический мониторинг окружающей среды по многозональным космическим снимкам // Космична наука і технологія. — 1999. — Т. 5, № 4. — С.1–3.
2. Загородня С.А., Шевякіна Н.А., Новік М.І., Радчук І.В. Дослідження екологічного стану Кременчуцького водосховища в межах Черкаської області методами ДЗЗ // Учёные записки Таврического национального университета имени В.И.Вернадского. Серия «География». — 2010. — Т. 23(62), № 2. — С.84–91.
3. Шевчук С.А., Шевченко І.А. Визначення екологічного стану водосховищ за допомогою методів дистанційного моніторингу // Меліорація і водне господарство. — 2013. — Вип. 100(2). — С.42–53.
4. Біотехнологія одержання біодобрива з відпрацьованого субстрату синьо-зелених водоростей. Еколого-енергетичні проблеми сучасності // Збірник наукових праць всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених та студентів, Одеса, 14 квітня 2017 р. — 128 с.
5. EarthExplorer — USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
6. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування: монографія / За ред. В.І.Лялько, М.О.Попова. — К.: Наук. думка, 2006. — 360 с.
7. Водний фонд України: Штучні водойми — водосховища і ставки: Довідник / За ред. В.К.Хільчевського, В.В.Гребеня. — К.: Інтерпрес, 2014. — 164 с.
8. Красовський Г.Я. Космічний моніторинг безпеки водних екосистем із застосуванням геоінформаційних технологій. — К.: Інтертехнологія, 2008. — 480 с.
9. Красовський Г.Я., Петросов В.А. Введение в методы космического мониторинга окружающей среды. — Харьков: Гос. Аэрокосм. ун-т им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», 1999. — 205 с.
10. Красовський Г.Я., Волошкіна О.С., Пономаренко І.Г., Слободян В.О. Інвентаризація водойм регіону з застосуванням космічних знімків і геоінформаційних систем // Екологія і ресурси. — 2005. — № 11.
11. Електронний ресурс: <https://landsat.usgs.gov/>
12. Landsat 7 Science Data Users Handbook. National Aeronautics and Space Administration (NASA).
13. Кохан С.С., Востоков А.Б. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: Підручник. — К.: Вища шк., 2009. — 511 с.
14. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors Remote Sensing of Environment / By: G. Chander, B.L. Markham, and D.L. Helder.
15. Bruce C., Hilbert D. Pre-processing Methodology for Application to Landsat TM,ETM+ Imagery of the Wet Trop.
16. Landsat 8 Data Users Handbook. Version 2.0. — Department of the Interior U.S. Geological Survey. — March 29, 2016.
17. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. Bernardo B. da Silva, Alexandra C. Braga, Céilia C. Braga, etc.
18. ATCOR for IMAGINE 2014. Haze Reduction, Atmospheric and Topographic Correction. User Manual ATCOR2 and ATCOR3.
19. Бардиш Б., Буришинська Х. Використання вегетаційних індексів для ідентифікації об'єктів земної поверхні // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. — 2014. — Випуск II(28). — С.82–88.
20. Валяльщикова А.А. Силкин К.Ю., Кульнев В.В. Анализ экологического состояния Матурского водохранилища по данным эколого-гидрохимического и спутникового мониторинга // Вестник ВГУ. Серия: геология. — 2014. — № 1. — С. 110–117.
21. Силкин К.Ю. Методика оценки экологического состояния Воронежского водохранилища по материалам многозонального дистанционного зондирования // Вестник ВГУ, серия: геология. — 2012. — № 1. — С.220–223.
22. Зюман Б.В., Плакущий В.О., Дігтяр С.В. Результати дослідження екологічної ситуації на каскаді водосховищ річки Дніпро // Науковий вісник КУЕІТУ. Нові технології. Екологічна та економічна безпека. — 2013. — № 1–2 (39–40). — С.106–109.

Использование аэрокосмических методов и методов обработки данных дистанционного зондирования Земли для экологического мониторинга Каховского водохранилища

Беленок В.Ю., Деркач Д.И., Рудь Н.В.

Национальный авиационный университет, 03058, г. Киев, пр. Космонавта Комарова, 1

В статье выполнен анализ экологического состояния Каховского водохранилища с использованием данных дистанционного зондирования Земли и методов их цифровой обработки, в частности, метода синтеза мультиспектрального изображения (Composite), создания мозаики снимков, радиометрической и атмосферной коррекции, спектральных преобразований значений пикселей космических снимков и зональной статистики ArcGIS. Исследование проведено на основе космических снимков Landsat за 1977–2017 гг. Рассчитанные на территорию водохранилища значения температуры и вегетационных индексов, а также визуальный анализ мультиспектрального изображения позволили идентифицировать участки Каховского водохранилища с наибольшими значениями температуры и интенсивным распространением сине-зелёных водорослей.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; обработка данных дистанционного зондирования; эвтрофирование водоёмов; экологический мониторинг; Каховское водохранилище.

Use of aerospace methods and image processing methods of remote sensing of the Earth for environmental monitoring of Kakhovka reservoir

Belenok V.Yu., Derkach D.I., Rud N.V.

National Aviation University, Kosmonavta Komarova Avenue 1, 03058 Kyiv, Ukraine

The creation of a cascade of reservoirs on the Dnieper led to the emergence of many environmental problems, in particular, flooding of adjacent lands to reservoirs, shore abrasion, “flowering of water” etc. In recent decades, in the study of environmental problems in the biosphere, aerospace research methods have been increasingly attached importance. The specificity of the application of space imagery and the obtaining of new information with their help is due to their visibility, the possibility of studying the Earth’s surface at various levels of generalization. Changes in the water regime negatively affected the oxygen regime of reservoirs, quite often leads to the death of fish. The Kakhovka Reservoir is characterized by fairly high indicators of total solar radiation, which contributes to its overgrowing by higher aquatic vegetation, especially in the shallow upper part, and the “flowering” of water caused by the rapid reproduction of blue-green algae in a large part of the water area (up to 80–95%). The peak of this process, as a rule, falls on July–August. The analysis of the ecological state of the Kakhovka reservoir using remote sensing data of the Earth and methods for their digital processing, in particular, the method of synthesis of the multispectral image (Composite), creation of a mosaic of images, radiometric and atmospheric correction, spectral transformations of pixel values of space images and zonal statistics of ArcGIS are performed in this article. The study was carried out on the basis of the Landsat satellite images for 1977–2017. An analysis of the temperature regime of the Kakhovka Reservoir showed that the highest temperature was recorded in 2010 and allowed to allocate on the space images the sections of the reservoir with the highest temperature. At the same sites, the most active processes of “flowering” of water were detected using the calculated values of vegetation indices. This confirms the efficiency and feasibility of using remote sensing data processing to perform environmental monitoring and assessment of the state of large-scale water bodies, in particular reservoirs.

Keywords: remote sensing; image processing; eutrophication of reservoirs; environmental monitoring; Kakhovka Reservoir.

Надійшла до редакції / Received	15.08.2017
Виправлена авторами / Revised	24.10.2017
Прийнята до друку / Accepted	25.10.2017