

УДК 528.8.04

DOI <https://doi.org/10.32782/apcmj.2023.2.1>**Беленок Вадим Юрійович,**

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою,
Національний авіаційний університет,
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна
ORCID: 0000-0001-5357-7493
E-mail: belenok.vadim@nau.edu.ua

Фролова Анастасія Анатоліївна,

магістрантка кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою,
Національний авіаційний університет,
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна
E-mail: 5676166@stud.nau.edu.ua

КОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ЗМІН ПЛОЩ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ КИЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ ВПРОДОВЖ 1990–2020 РР.

Анотація. *Описано методику застосування даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для аналізу змін площ об'єктів водного фонду Київської області впродовж 1990–2020 рр. Проаналізовано відкриті дані ДЗЗ оптичного діапазону та їх ефективність у використанні для вирішення поставлених завдань. Проаналізовано різні вегетаційні індекси та запропоновано використання їх комбінацій для ідентифікації об'єктів водного фонду Київської області. Використано супутникові дані місії Landsat Level 2 Collection 2 та платформу Google Earth Engine, за допомогою яких виконано виділення об'єктів водного фонду Київської області на основі комбінованих критеріїв. У програмному забезпеченні ArcGIS побудовано тематичні карти аналізу змін об'єктів водного фонду Київської області за досліджуваний період та виконано обчислення відповідних площ.*

Ключові слова: *дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), вегетаційні індекси (VI), водні ресурси, космічний моніторинг змін, Landsat, одержання водних об'єктів зі знімків.*

Belenok Vadym, Frolova Anastasiia. THE SPACE MONITORING OF CHANGES IN THE AREA OF WATER OBJECTS IN THE KYIV REGION IN THE PERIOD 1990–2020

Abstract. *The technique of application of remote sensing data for the analysis of changes in the area of the water objects of the Kyiv region during 1990–2020 is described. The open remote sensing data of optical range and their effectiveness in using for the solution of the set tasks are analyzed. Various vegetation indices were analyzed and their combinations were suggested for identification of the Kyiv region water objects. Satellite data from Landsat Level 2 Collection 2 missions and Google Earth Engine platform were used that were used for allocation of the Kyiv region water objects on the combined criteria. Thematic maps of the analysis of changes in the water objects of the Kyiv region during the study period were built in the ArcGIS software and the corresponding areas were calculated.*

Key words: *remote sensing, vegetation indices, water resources, space monitoring of changes, Landsat, water extraction.*

1. Вступ

Наземні поверхневі водні об'єкти, до яких належать озера, річки, водосховища, ставки та частково загачені сільськогосподарські угіддя, є критично важливим компонентом водних ресурсів для життя людини та наземних екосистем [27]. Водні ресурси є життєво необхідними як для екосистеми, так і для соціально-економічного розвитку, тому точне картографування поверхневих вод є важливим для різних гідроло-

гічних досліджень, а також для управління водними джерелами, спостереження за повеннями та політичною стабільністю [18]. У зв'язку з активною зміною кліматичних умов останніми роками гострою проблемою постало питання моніторингу природних ресурсів, зокрема водних. Аналіз змін водних об'єктів дозволяє виявити причини погіршення або покращення ситуації та спланувати подальші дії щодо їх збереження та відновлення.

Україна входить у перелік країн з недостатнім забезпеченням водними ресурсами і є однією з найменш водозабезпечених у Європі (27-е місце за показником забезпеченості загальними відновними водними ресурсами на людину, 37 – за внутрішніми) [29].

Відповідно до досліджень через погіршення екологічної ситуації до кінця століття у більшості басейнів України річковий стік зміниться, зокрема:

- у басейні Дніпра передбачається зниження водного стоку у середньому до -20% (до 24% влітку), із січня по березень можливе невелике збільшення стоку;

- у басейні Західного Бугу стік може зменшитися у середньому від 28% до 30% в усі місяці, крім лютого; найбільше зниження очікується восени (до 32%);

- у басейні Дністра на кінець століття очікується катастрофічне зниження стоку – в окремі місяці до 36–38%;

- зменшення водного стоку басейну річки Прип'ять буде перебувати в діапазоні від -12 до -23%, в період літньої межени може сягнути 37%;

- у басейні Десни у січні–березні водний стік може зрости від 28% до 45%;

- у басейні Південного Бугу наприкінці століття очікується зниження середнього річного стоку до 30%, а в окремі місяці – до 45%.

Одним з джерел для аналізу змін водних ресурсів є дані дистанційного зондування Землі. Останніми роками сильно підвищилася їхня якість, різноманітність та доступність. Дистанційні методи дозволяють швидко отримати дані на будь-яку територію. Використовуючи мультиспектральні знімки, отримані під час космічної зйомки, можна одержати дані не тільки про розміщення та площу водного об'єкта, а й про його хімічний склад. Тому використання даних дистанційного зондування Землі має багато переваг порівняно з наземними дослідженнями.

Метою роботи є дослідження водних ресурсів Київської області та аналіз змін водних об'єктів за допомогою матеріалів дистанційного зондування Землі впродовж 1990–2020 рр.

2. Аналіз наукових досліджень

Антропогенна діяльність дуже впливає на поверхню суші Землі загалом та поверхневі водні об'єкти зокрема [3; 5]. Трансформація природних екосистем у результаті діяльності людини змінює біофізичні властивості земної поверхні. Картування змін типів земельного покриву є одним з найбільш важливих та перших застосувань технології ДЗЗ, яке постійно розвивається та вдосконалюється. Дистанційне зондування – це технологія ефективного та точного картографування земного покриву у великих масштабах. Є безліч переваг, таких як повторюваність спостережень, рентабельність та відстеження змін у часі [7]. Оновлення та покращення типів даних дозволяють досягти значного прогресу в картографуванні земного покриву з різним значенням просторової розрізненості [8].

У разі виділення водних об'єктів, як і у разі виділення типів землекористувань загалом використовують оптичні та радарні дані ДЗЗ, методи класифікації та ВІ. Дешифрування водних об'єктів на основі різних ВІ було виконано в роботах [26; 2; 22; 14], а з використанням класифікації – у роботах [5; 20; 10; 21] та багатьох інших. Варто зазначити, що використання контрольованої класифікації для вирішення завдання дешифрування лише водних об'єктів, а не всіх типів землекористувань і землеволодінь території, призводить до значної надлишкової роботи, пов'язаної зі створенням еталонних вибірок для всіх класів.

Проаналізуємо ефективність застосування критеріїв дешифрування водних об'єктів для Київської області.

3. Матеріали та методи

3.1. Характеристика території дослідження

Річки Київської області переважно належать до басейну Дніпра, а на півдні області – до басейну Південного Бугу, але їх набагато менше. В межах області формується близько 2,04 км³ стоку, тобто повністю протікають у межах Київської області лише невеликі річки протяжністю 40–50 км. На розвиток річкової мережі та режим річок вплинули фізико-географічні зони, на території яких знаходиться область мішаних лісів і Лісостепу.

Також на формування гідрографічної мережі сильно вплинув рельєф.

Територія дослідження (Київська область) показана на рис. 1. Карти побудовано з використанням геоінформаційних технологій, як описано в [16] і [25].

На малих і середніх річках Київської області, за даними відомчої інвентаризації, проведеної міжрайонними управліннями водного господарства Київводресурсів, знаходиться понад 2533 ставків і 62 водосховища об'ємом води 193,97 млн м³.

Найбільша кількість водосховищ розташована у Правобережній лісостеповій частині області, в районах, що не мають безпосереднього виходу до Дніпра, таких як: Білоцерківський, Сквирський, Васильківський, Тетіївський. Навпаки, в районах, що розташовані на берегах Дніпра, потреба у додаткових штучних водоймах (без врахування Київського і Канівського водосховищ), як правило, незначна або і зовсім відсутня (Обухівський, Пере-

яславський, Вишгородський, Бориспільський райони).

До найбільших водосховищ Київської області з корисним об'ємом понад 10 млн м³ належать такі:

1. Білоцерківське (верхнє), р. Рось (хут. Глибичка Білоцерківського району) з площею водного дзеркала 617,0 га та повним об'ємом 16,96 млн м³;

2. Великий Супій, р. Супій (м. Яготин Яготинського району) з площею водного дзеркала 1040,0 га та повним об'ємом 20,2 млн м³;

3. Малий Супій № 2, р. Супій (с. Червоне Заріччя Яготинського району) з площею водного дзеркала 421,0 га та повним об'ємом 10,4 млн м³;

4. Малий Супій № 3, р. Супій (м. Яготин Яготинського району) з площею водного дзеркала 576,0 га та повним об'ємом 13,1 млн м³.

Отже, найбільші водосховища знаходяться в Яготинському районі, що зумовлене недостатніми місцевими водними ресурсами за



Рис. 1. Територія дослідження

значних потреб у них з боку промислових підприємств та сільського господарства та гідрологічними умовами і можливостями р. Супій.

Крім того, в межах області знаходяться водосховища Дніпровського каскаду: Київське та Канівське, які належать до компетенції Дніпровського басейнового управління водних ресурсів.

Озера Київської області вивчені не досить. Більшість озер знаходяться на Лівобережжі. На правому березі набагато менше озер, у деяких районах їх взагалі немає (райони в межах Придніпровської височини).

3.2. Матеріали

У роботі було використано дані ДЗЗ оптичного діапазону супутникових місій Landsat TM/OLI.

Програма Landsat – найбільш тривалий проєкт із отримання супутникових знімків Землі. Перший із супутників у рамках програми був запущений у 1972 р.; останній натепер, Landsat 9 зі сканером типу pushbroom, був запущений 27 вересня 2021 р. Знімки Landsat є унікальним ресурсом для проведення багатьох наукових досліджень у галузі сільського господарства, картографії, геології, лісівництва, розвідки, освіти та національної безпеки [15].

На супутниках Landsat місій 3–5 було встановлено два типи сканерів whiskbroom, які забезпечували зйомку земної поверхні з різною просторовою і спектральною розрізненістю – MSS (Multispectral Scanner) та TM (Thematic Mapper). Дані MSS (просторова розрізненість 80 м) доступні з 1972 р., дані TM (просторова розрізненість 30 м у видимому, ближньому та середньому ІЧ спектральних каналах, 120 м – у тепловому діапазоні) – з 1982 р. [16]. Супутник Landsat 5 знаходився на орбіті у 1984–2012 рр.

На супутнику Landsat 7 був встановлений сканер ETM+, який є вдосконаленим варіантом сканерів TM. Інструмент Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) – це фіксований восьмидіапазонний мультиспектральний скануючий радіометр, здатний надавати інформацію про зображення поверхні Землі з високою просторовою розрізненістю. Він виявляє спектрально-фільтроване випромінювання у VNIR, SWIR, LWIR та панхроматичному діа-

пазоні від освітленої сонцем Землі у смузі шириною 183 км, на орбіті на висоті 705 км. Основними новими функціями Landsat 7 була панхроматична смуга з просторовою розрізненістю 15 м, вбудований сонячний калібратор з повною апертурою, 5% абсолютне радіометричне калібрування та тепловий ІЧ-канал із чотириразовим покращенням просторової розрізненості порівняно з TM. Супутник знаходився на орбіті у 1999–2021 рр.

Landsat 8 працює з 2013 р. і має два датчики типу pushbroom – Operational Land Imager (OLI) та TIRS (Thermal Infrared Sensor). OLI проводить знімання у видимій, ближній ІЧ та короткохвильовій ІЧ частинах (VNIR, NIR та SWIR) спектра. TIRS вимірює температуру поверхні Землі в двох теплових діапазонах. Зображення Landsat 8 мають 15-метрову панхроматичну та 30-метрову багатоспектральну просторову розрізненість уздовж смуги 185 км.

У 2016 р. USGS реорганізував архів Landsat у багаторівневу структуру управління колекцією під назвою Landsat Collection 1. Ця структура гарантує, що всі продукти Landsat Level-1 забезпечують узгоджений архів відомої якості даних, одночасно контролюючи постійне вдосконалення архіву та доступ до всіх даних у міру їх отримання. Collection 1 містить усі дані рівня 1, отримані з 1972 р. дотепер від Landsat 1-8. Landsat 9 доступний лише в колекції 2.

Основною характеристикою Landsat Collection 2 є значне покращення абсолютної точності геолокації глобального набору наземних еталонних даних, що використовується в потоці обробки Landsat Level-1. Крім того, колекція 2 включає оновлені джерела глобального цифрового моделювання висот, оновлення для калібрування та перевірки, а також глобальні продукти спектральної відбивної здатності поверхні і температури поверхні 2 рівня з 1982 р. і дотепер. Колекція 2 містить усі датчики Landsat 1-9 [15].

Дані рівнів діляться на Real-Time (RT), Tier 1 (T1) та Tier 2 (T2). Tier 1 – сцени Landsat з найвищою доступною якістю даних, Tier 2 – сцени Landsat, що не відповідають критеріям Tier 1 під час обробки.

У цій роботі було використано колекції знімків USGS Landsat 5 Level 2, Collection 2, Tier 1 за період 01.06.1990–31.08.1990 та USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1 з прив'язкою WGS84(UTM) за період 01.06.2020–31.08.2020 на територію Київської області. Обробку матеріалів ДЗЗ виконано на платформі «хмарних обчислень» Google Earth Engine.

Колекції зменшено до одного зображення, обчисливши медіану всіх значень для кожного пікселя у стеку всіх відповідних каналів. Перед цим виконане маскування хмар. Ці набори даних містять атмосферно скореговані значення *surface reflectance* (спектральної здатності відбиття поверхні) та температуру поверхні Землі, отримані з даних, отриманих датчиками Landsat TM (Landsat 5) та Landsat OLI та TIRS (Landsat 8).

Зауважимо, що підвищити просторову розрізненість сенсорів видимого діапазону для виконання моніторингу можна за рахунок використання субпіксельних технологій обробки зображень, як описано в [6; 28].

3.3. Методи

Розглянемо ВІ, що використовуються для ідентифікації водних об'єктів Київської області.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормалізований диференційний ВІ. Значення коливаються в діапазоні від -1 до +1. Він розраховується за формулою [4]:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (1)$$

де ρ_{NIR} – значення відбиття у каналі В4 знімків Landsat TM NIR діапазону спектра для довжин хвиль 0,77–0,90 мкм, на космознімках із супутника Landsat 5 TM цей канал виділяє берегову лінію водоймища та відображає рівень розвитку біомаси рослинності; ρ_{RED} – значення відбиття у каналі В3, що є червоним діапазоном видимого спектра відбиття сонячного випромінювання зі значенням довжини хвилі 0,63–0,69 мкм, використовується для оцінки стану та якості рослинності. Оскільки у NIR діапазоні відбивна здатність води нижча, ніж у видимому, індекс вегетації для води має від'ємні значення. Проте, наприклад, у разі евтрофікації значення водойм будуть вище нульових.

Для цього ВІ ми прийняли порогове значення 0,2, більші значення замаскуються.

NDWI (Normalized Difference Water Index) – нормалізований диференційний водний індекс, змінюється від -1 до +1. Розраховується за формулою [17]:

$$NDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{NIR}}{\rho_{GREEN} + \rho_{NIR}}, \quad (2)$$

де ρ_{GREEN} – значення відбиття у каналі В2, що є зеленим каналом видимого спектра з діапазоном довжин хвиль 0,52–0,60 мкм.

Водні об'єкти виділено в інтервалі від -0.2 і більше.

MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) – модифікований нормалізований диференційний водний індекс. Індекс виводить значення між -1 і +1. Розраховується за формулою [24]:

$$MNDWI = \frac{\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR1}}{\rho_{GREEN} + \rho_{SWIR1}}, \quad (3)$$

де ρ_{SWIR1} – канал 5 у знімках Landsat TM короткохвильового ІЧ спектра відбиття з діапазоном довжин хвиль 1,55–1,75 мкм.

Водні об'єкти мають більш високі позитивні значення, ніж NDWI, позаяк вони поглинають більше короткохвильові інфрачервоні (SWIR) довжини хвиль, ніж ближні інфрачервоні (NIR). Індекс більш ефективний порівняно з NDWI, якщо досліджена берегова лінія знаходиться поруч із забудовою.

У значеннях цього ВІ водні об'єкти мають величину більше -0,1.

WRI (Water Ratio Index) – індекс співвідношення води. Розраховується за формулою [19]:

$$WRI = \frac{\rho_{GREEN} + \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}}. \quad (4)$$

Для виділення водних об'єктів прийняте порогове значення 1 і вище.

WNDWI (Weighted Normalized Difference Water Index) – зважений нормалізований водний індекс. Розраховується за формулою:

$$WNDWI = \frac{\rho_{GREEN} - a \cdot \rho_{NIR} - (1 - a) \cdot \rho_{SWIR1}}{\rho_{GREEN} + a \cdot \rho_{NIR} + (1 - a) \cdot \rho_{SWIR1}}, \quad (5)$$

де ρ_{SWIR1} – відбиття в короткохвильовій інфрачервоній області спектра;

a – ваговий коефіцієнт, змінюється від 0 до 1.

У цій роботі коефіцієнт $a = 0,5$, позаяк він дає найкращий результат [13]. Водні об'єкти виділено у інтервалі від -0.1 і більше.

AWEI (Automated Water Extraction Index) – автоматизований індекс виділення

води дозволяє ефективно розділити водні та не водні пікселі за рахунок одночасного використання чотирьох спектральних каналів. Коефіцієнти у виразі цього індексу емпірично підібрані таким чином, щоб спостерігалася максимальна відмінність водних пікселів від пікселів різних типів рослинного покриву [12]:

$$AWEI_{nsh} = 4 \cdot (\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR1}) - (0.25 \cdot \rho_{NIR} + 2.75 \cdot \rho_{SWIR2}), \quad (6)$$

$$AWEI_{sh} = \rho_{BLUE} + 2.5 \cdot \rho_{GREEN} - 1.5 \cdot (\rho_{NIR} + \rho_{SWIR1}) - 0.25 \cdot \rho_{SWIR2}, \quad (7)$$

де ρ_{SWIR2} – відбиття у каналі 7 Landsat TM короткохвильового ІЧ спектра з діапазоном довжин хвиль 2,08–2,35 мкм.

Водні об’єкти у цьому індексі виділено у інтервалі від -0,2 і більше.

EVI (Enhanced Vegetation Index) – індекс, що використовує один синій, один червоний та один NIR діапазони спектра для зменшення впливу аерозолів [1]:

$$EVI = 2.5 \cdot \frac{NIR - RED}{NIR + 6 \cdot RED - 7.5 \cdot BLUE + 1}. \quad (8)$$

Нами цей ВІ використовувався у виборі критеріїв $AWEI_{nsh}$ і $AWEI_{sh}$.

4. Результати

Для виділення водних об’єктів було використано ВІ NDVI, NDWI, MNDWI, WRI, WNDWI та $AWEI_{nsh}$, а також швидкий метод автоматичного вилучення води – multiple index water detection rule (MIWDR), у цьому методі використовуються декілька індексів,

включаючи NDVI, EVI, MNDWI та $AWEI$. Якщо піксель відповідає таким критеріям:

$$(AWEI_{nsh} - AWEI_{sh} > -0.1) \wedge (MNDWI > NDVI \vee MNDWI > EVI), \quad (9)$$

то він класифікується як водний об’єкт, якщо ні, то він класифікується як неводний об’єкт [11]. Для розрахунку було використано платформу Google Earth Engine. Індекси обчислюються з використанням спектральних каналів відповідно до формул (1)–(8). Далі вихідні растри завантажуються на комп’ютер. На рис. 2 представлено вікно з редактором коду Google Earth Engine, на рис. 3 – приклади обрахованих растрів ВІ за 1990 р. Аналогічно було розраховано ВІ за 2020 р.

Для подальшої роботи було використано програмний комплекс ESRI ArcGIS 10.4. Спочатку обрізано растри індексів по кордону Київської області за допомогою інструмента «Вирізати». Для виділення водних об’єктів вибрано порогові значення для кожного індексу, інші значення замасковано за допомогою інструмента «Калькулятор растру». Приклади растрів водних масок наведено на рис. 4.

Після виділення водних об’єктів за допомогою «Калькулятора растру» використовуємо інструмент «Перекласифікація (модуля 3D Analyst)» для перетворення растру на бінарний. Після цього перетворюємо растр на полігон інструментом «Растр у полігони» та обраховуємо площу. Значення площ представлено у табл. 1 та табл. 2.

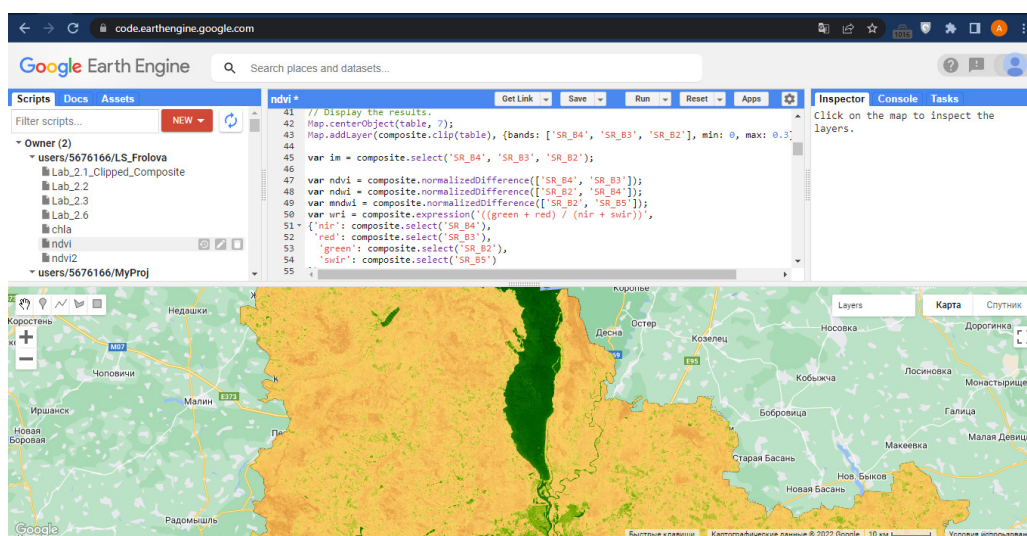


Рис. 2. Вікно з редактором коду Google Earth Engine

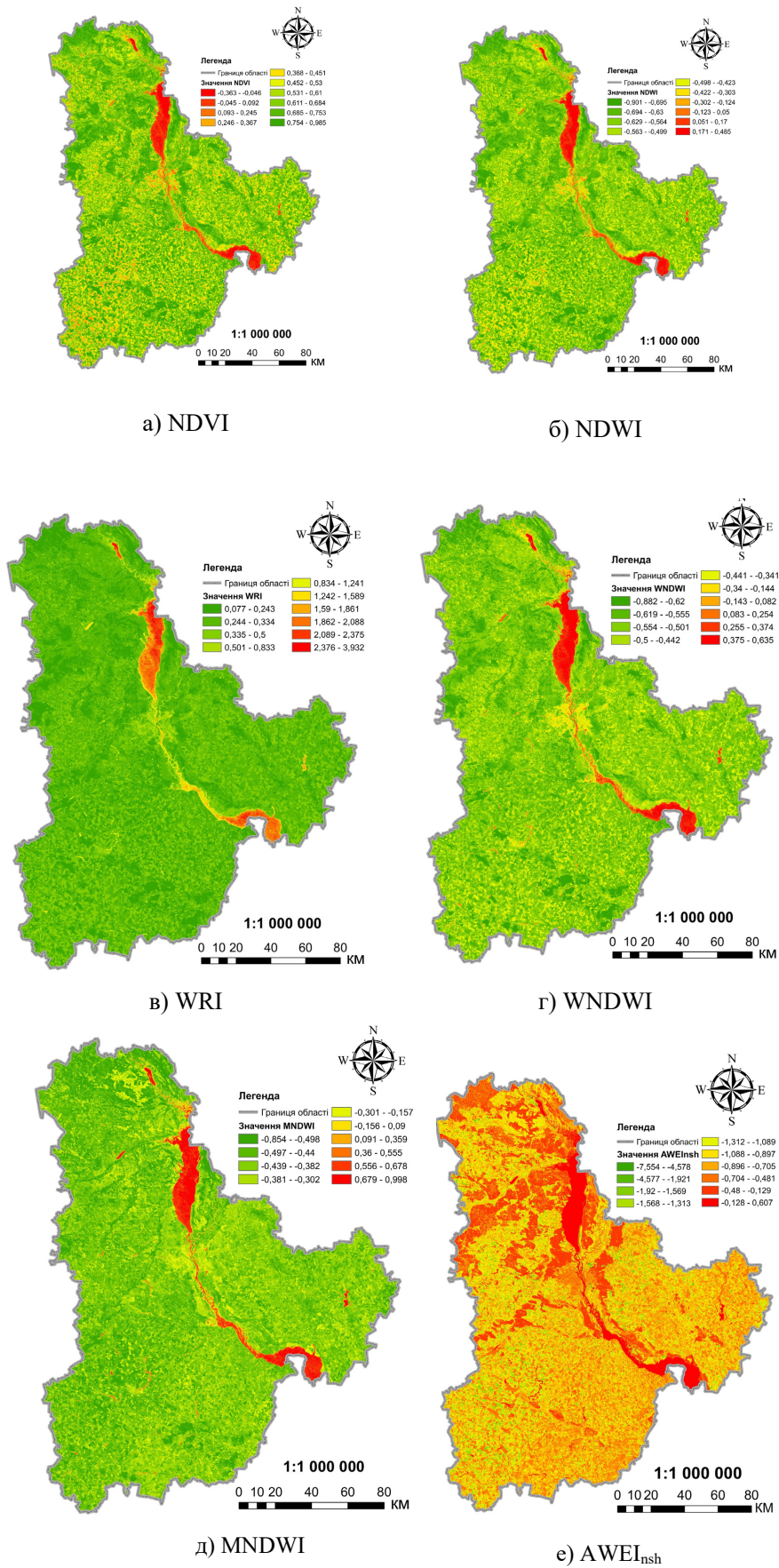


Рис. 3. Обчислення растрових поверхонь ВІ за 1990 р.

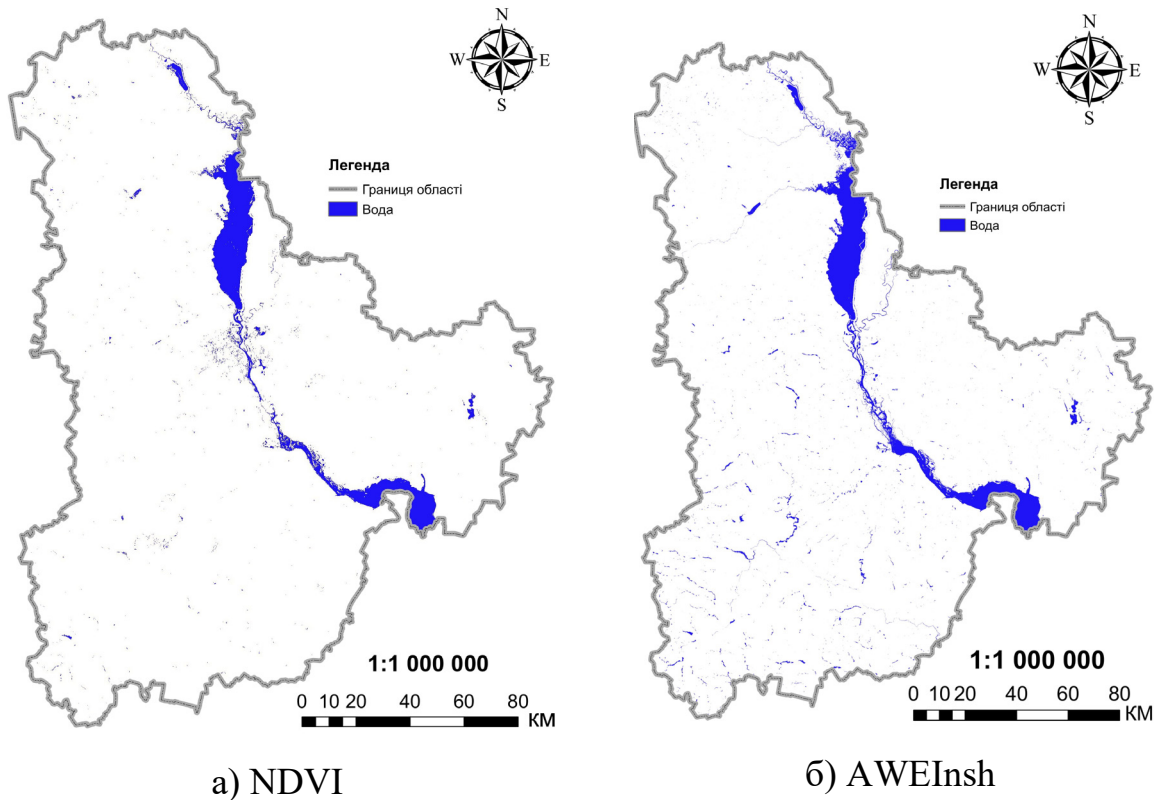


Рис. 4. Растри водних масок за 1990 р.

Таблиця 1

Розраховані значення (1990 р.)

Індекс	Діапазон значень	Площа, га (1990)	ОА, %	РА, %		UA, %		КНАТ
				water	non water	water	non water	
NDVI	<0,2	107685,781	78,36	57,41	99,38	98,94	69,93	0,57
NDWI	>-0,2	116457,106	87,01	74,38	99,69	79,51	99,57	0,74
MNDWI	>-0,1	131275,540	92,73	85,49	100	100	87,30	0,86
WRI	>1	110626,768	83,93	67,90	100	100	75,64	0,68
WNDWI	>-0,1	119331,828	91,19	82,41	100	100	85,00	0,82
AWEInsh	>-0,2	131656,680	93,20	86,42	100	100	88,01	0,86
MIWDR	згідно умови (9)	109176,539	81,61	63,27	100	100	73,08	0,63

Таблиця 2

Розраховані значення (2020 р.)

Індекс	Діапазон значень	Площа, га (2020)	ОА, %	РА, %		UA, %		КНАТ
				water	non water	water	non water	
NDVI	<0,2	104767,836	80,37	62,87	98,45	97,67	71,95	0,61
NDWI	>-0,2	110090,925	88,43	78,14	99,07	98,86	81,43	0,77
MNDWI	>-0,1	115819,874	91,48	83,23	100	100	85,22	0,83
WRI	>1	101112,768	85,39	71,26	100	100	77,01	0,71
WNDWI	>-0,1	108723,587	89,80	79,94	100	100	82,82	0,80
AWEInsh	>-0,2	119748,048	92,54	85,33	100	100	86,83	0,85
MIWDR	згідно з умовами (9)	107704,361	90,23	80,84	100	100	83,46	0,81

Далі було побудовано матрицю помилок та обчислено статистику Каппа-Коена (*КНАТ*), яка є мірою точності (узгодження). Ця міра узгодження заснована на різниці між фактичною узгодженістю в матриці помилок (тобто узгодженістю між класифікацією даних ДЗЗ та еталонними даними, на що вказує головна діагональ) та випадковою узгодженістю, на що вказують підсумкові значення рядків та стовпців. Статистика визначається за формулою [9]:

$$КНАТ = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}, \quad (10)$$

де $n_{i+} = \sum_{j=1}^k n_{ij}$ – кількість зразків (пікселів), віднесених до класу i у класифікації пікселів як водних об’єктів;

$n_{+i} = \sum_{j=1}^k n_{ij}$ – кількість зразків, віднесених до класу j у наборі еталонних даних;

n_{ii} – кількість значень, що належать еталонному класу i , які також були класифіковані як клас i (тобто значення, знайдені на діагоналі матриці помилок);

k – кількість класів;

n – загальна кількість зразків.

Для початку, використовуючи вихідний растр, топографічні карти на територію дослідження та історичні знімки Google Earth, було згенеровано класи просторових точкових об’єктів, які були розподілені на два класи – «вода» і «не вода». Після цього перетворено точки у пікселі інструментом «Точки у растр». Потім скомбіновано отриманий растр з растром, що містить результати дешифрування водних об’єктів (який містить два класи – «вода» і «не вода»). Використовуючи таблицю атрибутів результуючого растру, створено зведену таблицю, за допомогою інструмента «Зведена таблиця» в ArcGIS. Отриману таблицю (матрицю помилок) конвертовано в MS Excel (рис. 5).

Classification	Reference_1	Reference_2	Ground_truth
water	285	0	285
non water	49	323	372
Total	334	323	657

Рис. 5. Матриця помилок

За допомогою матриці помилок обчислено значення Overall accuracy (загальної точності, сума правильно класифікованих пікселів по діагоналі поділена на загальну кількість пікселів), Producer’s accuracy (точності виробника, кількість правильно класифікованих пікселів класу, поділена на загальну кількість пікселів класу) та User’s accuracy (точності користувача, кількість правильно класифікованих пікселів класу поділена на загальну кількість пікселів класу в зображенні класифікації). Усі значення представлені у табл. 1 та табл. 2. Найкращі результати класифікації, згідно з оцінкою точності, були отримані за допомогою VI *AWEI_{nsh}*.

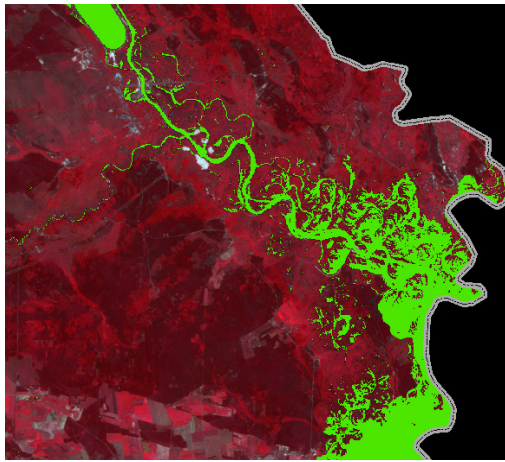
Після обчислення площ та оцінювання точності створено карту змін. Відповідно до результатів найбільші зміни відбулися на ділянках верхів’я Київського водосховища, менші – в основному руслі річки Дніпро та Канівському водосховищі (рис. 6–8).

Також помітні зміни деяких менших річок, наприклад, Протоки (рис. 9).

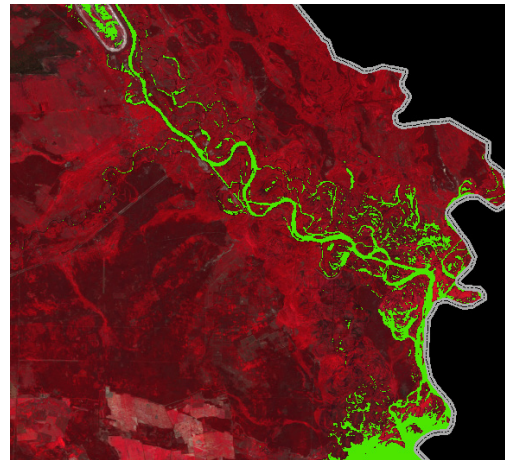
Загалом, спостерігається тенденція зменшення площ виділених водних об’єктів. Для цього може бути декілька причин, можливі з них: 1) обміління або пересихання водного об’єкта; 2) розвиток водної рослинності або сильне забруднення.

Обміління та пересихання водних об’єктів може бути наслідком екологічного або антропогенного впливу. До екологічних належить, наприклад, зміна клімату (підвищення температури води), до антропогенних – забруднення (дно засмічується, русло заростає, зникає зв’язок струмків з головним джерелом); використання великого об’єму води у сільськогосподарській діяльності; вирубка лісів (прибережні дерева притягують корінням воду, яка прямує у русло). Зміни клімату призводять до нерівномірних стихійних опадів, які спричинюють вертикальну міграцію поживних речовин, і до засухи, які сприяють горизонтальній міграції поживних речовин [23].

На деяких ділянках, на яких раніше виділялася вода, можна помітити низькі значення у синьому та червоному каналах та високі у зеленому. Це може свідчити про наявність у воді гідратитів, тобто водної рослинності.

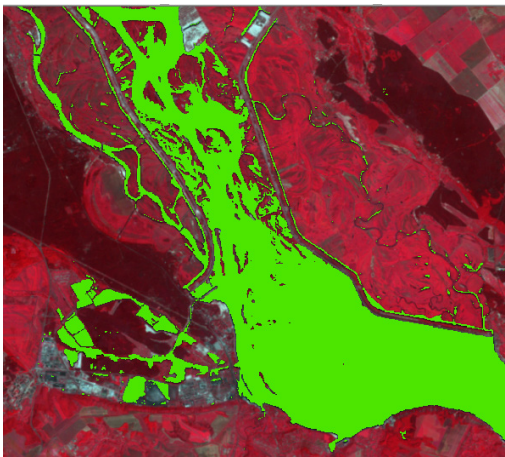


а) 1990 р.

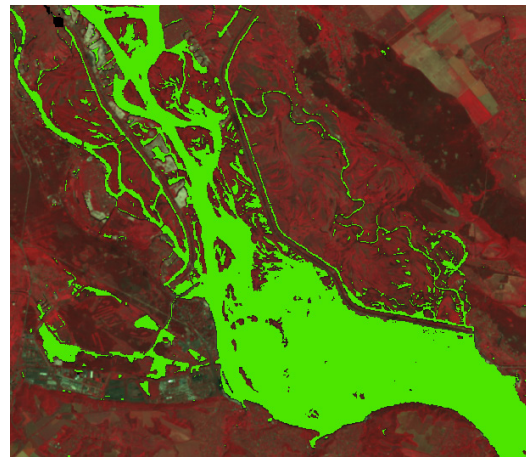


б) 2020 р.

Рис. 6. Результат дешифрування ділянок верхів'я Київського водосховища

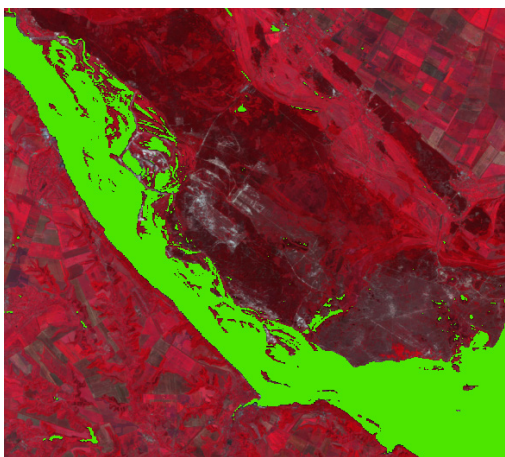


а) 1990 р.

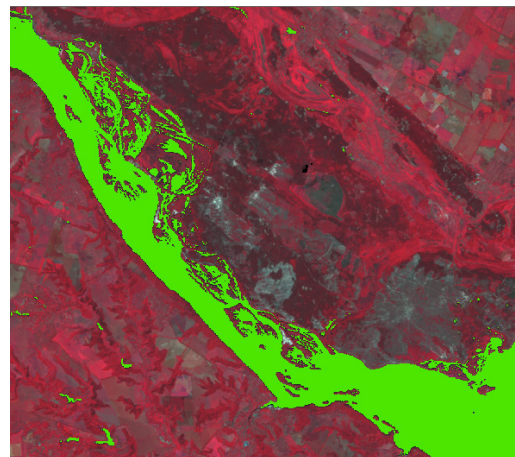


б) 2020 р.

Рис. 7. Результат дешифрування основного русла річки Дніпро



а) 1990 р.

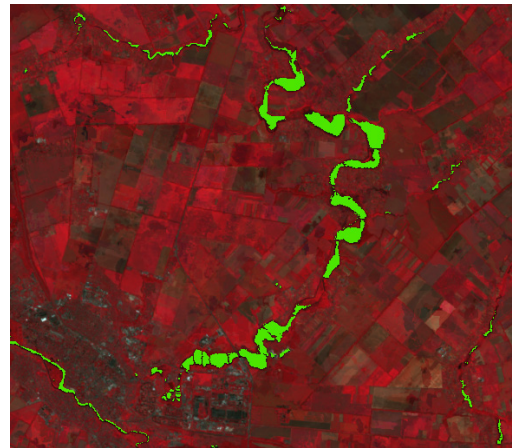


б) 2020 р.

Рис. 8. Результат дешифрування частини Каховського водосховища



а) 1990 р.



б) 2020 р.

Рис. 9. Результат дешифрування русла річки Протоки

«Цвітіння» води та розвиток водної рослинності виникає внаслідок активного антропогенного навантаження. Основними причинами такої ситуації є широке хімічне та бактеріальне забруднення, збільшення використання добрив зі вмістом фосфору й азоту, витоки з неофіційних звалищ пестицидів, скидання стічних вод, бактеріальне забруднення, спричинене неочищеним побутовим сміттям та неналежним зберіганням та обробкою гною. Також причиною може бути уповільнення течії, як у руслі Дніпра, та забудова заплавлених річкових земель.

5. Висновки

Виконано дешифрування водних об'єктів Київської області на основі даних ДЗЗ Landsat TM/ETM+/OLI. Для виділення пікселів водних об'єктів використано ВІ NDVI, NDWI,

MNDWI, WRI, WNDWI, $AWEI_{sh}$ та $AWEI_{nsh}$, а також швидкий метод автоматичного вилучення води – multiple index water detection rule (MIWDR). Для оцінки точності класифікації було створено матрицю помилок, обчислено статистику Карра НАТ, Overall accuracy, Producer's accuracy (PA), User's accuracy (UA).

Найкращі результати класифікації (згідно з оцінкою точності) були отримані за допомогою ВІ $AWEI_{nsh}$.

Визначено площі водних об'єктів. За результатами розрахунків за період 1990–2020 площа зменшилася на 7%. Це може бути результатом екологічного та антропогенного впливу. Відповідно до результатів найбільші зміни відбулися на ділянках верхів'я Київського водосховища, менші – в основному руслі Дніпра та Канівському водосховищі.

Список використаних джерел:

1. Asgari, S., Hasanlou, M. (2023). A Comparative Study of Machine Learning Classifiers for Crop Type Mapping Using Vegetation Indices. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 10 (4/W1-2022), 79–85. URL: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-79-2023>.
2. Belba, P., Kucaj, S., Thanas, J. (2022). Monitoring of Water Bodies and Non-vegetated Areas in Selenica – Albania with Sar and Optical Images. *Geomatics and Environmental Engineering*, 16 (3), 5–25. URL: <https://doi.org/10.7494/geom.2022.16.3.5>.
3. Belenok, V., Hebryn-Baidy, L., Bielousova, N., Gladilin, V., Kryachok, S., Tereshchenko, A., Alpert, S., Bodnar, S. (2023). Machine learning based combinatorial analysis for land use and land cover assessment in Kyiv City (Ukraine). *J. Appl. Remote Sens.* 17 (1), 014506. URL: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.17.014506>.
4. Belenok, V., Hebryn-Baidy, L., Bielousova, N., Zavarika, H., Sakal, O., Kovalenko, A. (2022). Geoinformation Mapping of Anthropogenically Transformed Landscapes of Bila Tserkva (Ukraine). *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectionis*, 21 (1), 69–84. URL: <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2022.21.1.69>.

5. Belenok, V., Noszczyk, T., Hebryn-Baidy, L., Kryachok, S. (2021). Investigating anthropogenically transformed landscapes with remote sensing. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Volume 24, 100635. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100635>.
6. Belenok, V.Yu., Burachek, V.G., Zatserkovny, V.I., Popov, M.A., and Stankevich, S.A. Subpixel image acquisition for detailed aerospace imaging, *Proceedings of the Eighth International Conference on Digital Technologies (DT'2011)*, Žilina, Slovakia, November 2011, pp. 289–293.
7. Belward, A., Skøien, J. (2015). Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103, 115–128. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.009>.
8. Cihlar, J. (2000). Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities. *Int. J. Remote Sens.* 21(6–7), 1093–1114. URL: <https://doi.org/10.1080/014311600210092>.
9. Congalton, R.G. (2015). Assessing positional and thematic accuracies of maps generated from remotely sensed data (Book Chapter). *Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies*, 583–601. URL: <https://doi.org/10.1201/b19294>.
10. Demirkan, D.Ç., Koz, A., Düzgün, H.A. (2020). Hierarchical classification of Sentinel 2-a images for land use and land cover mapping and its use for the CORINE system. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14 (2), 026524. URL: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.026524>.
11. Deng, Y., Jiang, W., Tang, Z., Ling, Z., Wu, Z. (2019). Long-Term Changes of Open-Surface Water Bodies in the Yangtze River Basin Based on the Google Earth Engine Cloud Platform. *Remote Sens.* 11 (19), 2213. URL: <https://doi.org/10.3390/rs11192213>.
12. Deng, Y., Jiang, W., Wu, Z., Ling, Z., Peng, K., Deng, Y. (2022). Assessing Surface Water Losses and Gains under Rapid Urbanization for SDG 6.6.1 Using Long-Term Landsat Imagery in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China. *International Journal of Remote Sensing*, 14(4), 881. URL: <https://doi.org/10.3390/rs14040881>.
13. Guo, Q., Pu, R., Li, J., Cheng, J. (2017). A weighted normalized difference water index for water extraction using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (19), 5430–5445. URL: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1341667>.
14. Guo, Q., Pu, R., Li, J., Cheng, J. (2017). A weighted normalized difference water index for water extraction using landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (19), 5430–5445. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1341667>.
15. Landsat Science. 7 лютого 2023 р. URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
16. Liashenko, D., Belenok, V., Spitsa, R., Pavlyuk, D., Boiko, O. (2020). Landslide GIS modelling with QGIS software. In: *XIV International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. European Association of Geoscientists & Engineers. Kyiv, Ukraine. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056069>.
17. McFeeters, S.K. (2013). Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a Geographic Information System to Detect Swimming Pools for Mosquito Abatement: A Practical Approach. *Remote Sensing*, 5 (7), 3544–3561. URL: <https://doi.org/10.3390/rs5073544>.
18. Melendo, J.D.V. (2015). Water as a strategic resource: international cooperation in shared basins and Geowater Journal of the Spanish Institute for Strategic Studies. *Journal of the Spanish Institute for Strategic Studies*, No. 5.
19. Mukherjee, N.R., Samuel, C. (2016). Assessment of the temporal variations of surface water bodies in and around Chennai using landsat imagery. *Indian Journal of Science and Technology*, 9 (18), 1–7. URL: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i18/92089>.
20. Nandika, M.R., Ulfa, A., Ibrahim, A., Purwanto, A.D. (2023). Assessing the Shallow Water Habitat Mapping Extracted from High-Resolution Satellite Image with Multi Classification Algorithms. *Geomatics and Environmental Engineering*, 17 (2). URL: <https://doi.org/10.7494/geom.2023.17.2.69>.
21. Pantazi, X.-E., Tamouridou, A.-A., Moshou, D., Cherif, I., Ovakoglou, G., Tseni, X., Kalaitzopoulou, S., Mourelatos, S., Alexandridis, T.K. Evaluation of machine learning approaches for surface water monitoring using Sentinel-1 data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 16 (4), 044501. URL: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.044501>.
22. Șerban, C., Maftai, C., Dobrică, G. (2022). Surface Water Change Detection via Water Indices and Predictive Modeling Using Remote Sensing Imagery: A Case Study of Nuntasi-Tuzla Lake, Romania. *Water (Switzerland)*, 14 (4), 556. URL: <https://doi.org/10.3390/w14040556>.
23. Stokal, V., Kovpak, A. (2021). Ecological Assessment of Water Quality For Different Water Uses: the Upstream Sub-Basin of the Dnieper and Desna Rivers. *Biological Systems: Theory and Innovation*, 12 (2), 24–40. URL: <http://dx.doi.org/10.31548/biologiya2021.02.003>.
24. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water

features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (14), 3025–3033. URL: <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.

25. Zatserkovny, V.I., Babych, V., Belenok, V., Frolov, H.O., Hebryn-Baidy, L. (2019). Black sea level change monitoring using altimetry data and geo-information technologies. In: *18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, May 2019, Kyiv, Ukraine. European Association of Geoscientists & Engineers, pp. 13–16. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902060>.

26. Zhao, B., Niu, S., Yang, X., Chang, J. (2023). Extraction Method of Fine Boundary of Glacial Lake Based on Spectral Morphological Information. *Jilin Daxue Xuebao (Diqu Kexue Ban). Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 53 (1), 307–319. URL: <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220049>.

27. Zou, Z., Xiao, X., Dong, J., Qin, Y., Doughty, R.B., Menarguez, M.A., Zhang, G., Wang, J. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2018, 115, 3810–3815. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.1719275115>.

28. Бурачек, В.Г. (2011). Эффективность применения субпиксельных технологий синтеза изображений объектов для крупномасштабной аэрокосмической съёмки / В.Г. Бурачек, В.И. Зацерковный, В.Ю. Беленок. *Черниговский научный электронный журнал ЧГИЭУ. Серия 2 «Техника и природа»* : электронный сборник научных работ. Чернигов : ЧГИЭУ, № 2 (2). С. 9–19.

29. Хильчевський, В.К. (2021). Характеристика водних ресурсів України на основі бази даних глобальної інформаційної системи FAO-AQUASTAT. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. № 1 (59). URL: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.1>.

References:

1. Asgari, S., Hasanlou, M. (2023). A Comparative Study of Machine Learning Classifiers for Crop Type Mapping Using Vegetation Indices. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 10 (4/W1-2022), 79–85. Retrieved from: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-79-2023>.

2. Belba, P., Kucaj, S., Thanas, J. (2022). Monitoring of Water Bodies and Non-vegetated Areas in Selenica – Albania with Sar and Optical Images. *Geomatics and Environmental Engineering*, 16 (3), 5–25. Retrieved from <https://doi.org/10.7494/geom.2022.16.3.5>.

3. Belenok, V., Hebryn-Baidy, L., Bielousova, N., Gladilin, V., Kryachok, S., Tereshchenko, A., Alpert, S., Bodnar, S. (2023). Machine learning based combinatorial analysis for land use and land cover assessment in Kyiv City (Ukraine). *J. Appl. Remote Sens.*, 17 (1), 014506. Retrieved from: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.17.014506>.

4. Belenok, V., Hebryn-Baidy, L., Bielousova, N., Zavarika, H., Sakal, O., Kovalenko, A. (2022). Geoinformation Mapping of Anthropogenically Transformed Landscapes of Bila Tserkva (Ukraine). *Acta Scientiarum Polonorum. Formatio Circumiectus*, 21 (1), 69–84. Retrieved from: <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2022.21.1.69>.

5. Belenok, V., Noszczyk, T., Hebryn-Baidy, L., Kryachok, S. (2021). Investigating anthropogenically transformed landscapes with remote sensing. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Volume 24, 100635. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100635>.

6. Belenok, V.Yu., Burachek, V.G., Zatserkovny, V.I., Popov, M.A., and Stankevich, S.A. (2011). Subpixel image acquisition for detailed aerospace imaging, *Proceedings of the Eighth International Conference on Digital Technologies (DT'2011)*, Žilina, Slovakia, November 2011, pp. 289–293.

7. Belward, A., Skøien, J. (2015). Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 103, 115–128. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.009>.

8. Cihlar, J. (2000). Land cover mapping of large areas from satellites: status and research priorities. *Int. J. Remote Sens.* 21(6–7), 1093–1114. Retrieved from: <https://doi.org/10.1080/014311600210092>.

9. Congalton, R.G. (2015). Assessing positional and thematic accuracies of maps generated from remotely sensed data (Book Chapter). *Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies*, 583–601. Retrieved from: <https://doi.org/10.1201/b19294>.

10. Demirkan, D.Ç., Koz, A., Düzgün, H.A. (2020). Hierarchical classification of Sentinel 2-a images for land use and land cover mapping and its use for the CORINE system. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14 (2), 026524. Retrieved from: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.14.026524>.

11. Deng, Y., Jiang, W., Tang, Z., Ling, Z., Wu, Z. (2019). Long-Term Changes of Open-Surface Water Bodies in the Yangtze River Basin Based on the Google Earth Engine Cloud Platform. *Remote Sens.* 11 (19), 2213. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/rs11192213>.

12. Deng, Y., Jiang, W., Wu, Z., Ling, Z., Peng, K., Deng, Y. (2022). Assessing Surface Water Losses and Gains under Rapid Urbanization for SDG 6.6.1 Using Long-Term Landsat Imagery in the Guangdong-Hong

Kong-Macao Greater Bay Area, China. *International Journal of Remote Sensing* 14(4), 881. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/rs14040881>.

13. Guo, Q., Pu, R., Li, J., Cheng, J. (2017). A weighted normalized difference water index for water extraction using Landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (19), 5430–5445. Retrieved from: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1341667>.

14. Guo, Q., Pu, R., Li, J., Cheng, J. (2017). A weighted normalized difference water index for water extraction using landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (19), 5430–5445. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1341667>.

15. Landsat Science. 7 February 2023. Retrieved from: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.

16. Liashenko, D., Belenok, V., Spitsa, R., Pavlyuk, D., Boiko, O. (2020). Landslide GIS modelling with QGIS software. In: XIV International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. European Association of Geoscientists & Engineers, Kyiv, Ukraine. Retrieved from: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056069>.

17. McFeeters, S.K. (2013). Using the Normalized Difference Water Index (NDWI) within a Geographic Information System to Detect Swimming Pools for Mosquito Abatement: A Practical Approach. *Remote Sensing*, 5 (7), 3544–3561. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/rs5073544>.

18. Melendo, J.D.V. (2015). Water as a strategic resource: international cooperation in shared basins and Geowater Journal of the Spanish Institute for Strategic Studies. *Journal of the Spanish Institute for Strategic Studies*, No. 5.

19. Mukherjee, N.R., Samuel, C. (2016). Assessment of the temporal variations of surface water bodies in and around Chennai using landsat imagery. *Indian Journal of Science and Technology*, 9 (18), 1–7. Retrieved from: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i18/92089>.

20. Nandika, M.R., Ulfa, A., Ibrahim, A., Purwanto, A.D. (2023). Assessing the Shallow Water Habitat Mapping Extracted from High-Resolution Satellite Image with Multi Classification Algorithms. *Geomatics and Environmental Engineering*, 17 (2). Retrieved from: <https://doi.org/10.7494/geom.2023.17.2.69>.

21. Pantazi, X.-E., Tamouridou, A.-A., Moshou, D., Cherif, I., Ovakoglou, G., Tseni, X., Kalaitzopoulou, S., Mourelatos, S., Alexandridis, T.K. Evaluation of machine learning approaches for surface water monitoring using Sentinel-1 data. *Journal of Applied Remote Sensing*, 16 (4), 044501. Retrieved from: <https://doi.org/10.1117/1.JRS.16.044501>.

22. Șerban, C., Maftai, C., Dobrică, G. (2022). Surface Water Change Detection via Water Indices and Predictive Modeling Using Remote Sensing Imagery: A Case Study of Nuntasi-Tuzla Lake, Romania. *Water (Switzerland)*, 14 (4), 556. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/w14040556>.

23. Stokal, V., Kovpak, A. (2021). Ecological Assessment of Water Quality For Different Water Uses: the Upstream Sub-Basin of the Dnieper and Desna Rivers. *Biological Systems: Theory and Innovation*, 12 (2), 24–40. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.31548/biologiya2021.02.003>.

24. Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27 (14), 3025–3033. Retrieved from: <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>.

25. Zatserkovny, V.I., Babych, V., Belenok, V., Frolov, H.O., Hebryn-Baidy, L. (2019). Black sea level change monitoring using altimetry data and geo-information technologies. In: 18th International Conference on Goinformatics – Theoretical and Applied Aspects, May 2019, Kyiv, Ukraine. European Association of Geoscientists & Engineers, pp. 13–16. Retrieved from: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902060>.

26. Zhao, B., Niu, S., Yang, X., Chang, J. (2023). Extraction Method of Fine Boundary of Glacial Lake Based on Spectral Morphological Information. *Jilin Daxue Xuebao (Diqu Kexue Ban)*. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 53 (1), 307–319. Retrieved from: <https://doi.org/10.13278/j.cnki.jjuese.20220049>.

27. Zou, Z., Xiao, X., Dong, J., Qin, Y., Doughty, R.B., Menarguez, M.A., Zhang, G., Wang, J. (2018). Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 115, 3810–3815. Retrieved from: <https://doi.org/10.1073/pnas.1719275115>.

28. Burachek, V.G. (2011). Effektivnost primeneniya subpikselnyih tehnologiy sinteza izobrazheniy ob'ektov dlya krupnomasshtabnoy aerokosmicheskoy s'yomki / V.G. Burachek, V.I. Zatserkovnyiy, V.Yu. Belenok. *Chernigovskiy nauchnyiy elektronnyiy zhurnal ChGIEU. Seriya 2 "Tehnika i priroda": elektronnyiy sbornik nauchnyih rabot*. Chernigov: ChGIEU, 2011. No. 2 (2). P. 9–19.

29. Khilchevskiy, V.K. (2021). Kharakterystyka vodnykh resursiv Ukrainy na osnovi bazy danykh hlobalnoi informatsiinoi systemy FAO-AQUASTAT. *Hidrolohiiia, hidrokhimiiia i hidroekolohiiia*, № 1 (59). Retrieved from: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.1>.