

**Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича**

**Географічний факультет
Кафедра географії України та регіоналістики**

**НАПІВАВТОМАТИЧНЕ ОЦИФРУВАННЯ ГІДРОЛОГІЧНИХ
ОБ'ЄКТІВ З ДОПОМОГОЮ QGIS 3.34
(НА ПРИКЛАДІ ДІЛЯНКИ РІЧКИ ПРУТ В МЕЖАХ
СІЛ БОЯНИ - МАРШИНЦІ)**

**Дипломна робота
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)**

Виконав: студент II курсу, групи 617
спеціальності

103 «Науки про Землю»

Георгій Павлович
(прізвище та ініціали)

Керівник : к.геогр.н., доц. кафедри географії,
України та регіоналістики

Микола Пасічник
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № 22

від “25” 11 2024 р.

Зав. кафедри _____ проф. Косташук І.І.

Чернівці – 2024

АНОТАЦІЯ

ПАВЛОВИЧ ГЕОРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ

Здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти

галузі знань 10 – Природничі науки, спеціальності 103 – Науки про Землю,

ОПП «Гідрологія»

кафедри географії України та регіоналістики

Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича,

м. Чернівці, Україна

НАПІВАВТОМАТИЧНЕ ОЦИФРУВАННЯ ГІДРОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З ДОПОМОГОЮ QGIS 3.34 (НА ПРИКЛАДІ ДІЛЯНКИ РІЧКИ ПРУТ В МЕЖАХ СІЛ БОЯНИ - МАРШИНЦІ)

Анотація. У магістерській роботі розглядаються методи напівавтоматичного цифрового картографування водних об'єктів із використанням спектральних індексів NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015 у програмному середовищі QGIS 3.34. Об'єктом дослідження є ділянка річки Прут між селами Бояни та Маршинці. Для аналізу використовувалися супутникові знімки місії Sentinel-2, отримані за допомогою платформи EO Browser. Було розроблено покрокову методику напівавтоматичного оцифрування та ідентифікації водної поверхні з використанням зазначених індексів. Основна увага приділялася порівнянню ефективності індексів NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015 для точного виділення водної поверхні річки Прут та визначенню найбільш придатних методів для моніторингу гідрологічних об'єктів у сільській місцевості. Розроблена методика є універсальною і може бути адаптована для інших річкових систем та географічних умов. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для покращення управління водними ресурсами, екологічного моніторингу та планування територій.

Ключові слова: напівавтоматичне цифрове картографування, спектральні індекси, NDWI, MNDWI, AWEI, WI2015, QGIS 3.34, річка Прут, моніторинг водних об'єктів, Sentinel-2, EO Browser

ABSTRACT

PAVLOVYCH HEORHII MYKOLAIOVYCH

Applicant of the second (master's) degree of higher education in the field of knowledge 10 – Natural sciences, specialty 103 – Earth sciences, educational program «Hydrology»

of the Department of Geography of Ukraine and Regional Studies at the Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

SEMI-AUTOMATIC DIGITIZATION OF HYDROLOGICAL OBJECTS WITH QGIS 3.34 (ON THE EXAMPLE OF THE PRUT RIVER SECTION WITHIN THE VILLAGES OF GREEN GROVE)

Abstract. This master's thesis examines methods of semi-automatic digital mapping of water bodies using spectral indices NDWI, MNDWI, AWEI, and WI2015 within the QGIS 3.34 software environment. The object of the study is a section of the Prut River between the villages of Boyany and Marshyntsi. Satellite images from the Sentinel-2 mission, obtained via the EO Browser platform, were used for analysis. A step-by-step methodology for semi-automatic digitization and identification of the water surface using the specified indices was developed. The main focus was on comparing the effectiveness of the NDWI, MNDWI, AWEI, and WI2015 indices for accurate delineation of the water surface of the Prut River and determining the most suitable methods for monitoring hydrological objects in rural areas. The developed methodology is universal and can be adapted for other river systems and geographical conditions. The practical significance of the work lies in the possibility of using the obtained results to improve water resource management, environmental monitoring, and territorial planning.

Keywords: semi-automatic digital mapping, spectral indices, NDWI, MNDWI, AWEI, WI2015, QGIS 3.34, Prut River, monitoring of water bodies, Sentinel-2, EO Browser.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів
мають посилання на відповідне джерело.



Г.М. Павлович

(підпис)

ЗМІСТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ I. ЦИФРОВЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ	9
1.1. Сучасні напрями цифрового картографування водних об'єктів	9
1.2. Дистанційне зондування Землі як інструмент виявлення водних тіл	10
1.3. Методи ідентифікації водних об'єктів на космічних знімках	12
1.4. Джерела даних для цифрового картографування водних об'єктів	16
1.4.1. Супутникові знімки Sentinel-2	16
1.4.2. Платформа EO Browser як інструмент отримання даних	19
1.5. Використання QGIS 3.34 для обробки та аналізу супутникових знімків	21
Висновок до розділу 1	23
Список використаних джерел до розділу 1	25
РОЗДІЛ II. ІНДЕКСИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВОДНОЇ ПОВЕРХНІ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ	27
2.1. Normalized Difference Water Index (NDWI)	27
2.2. Modified NDWI (MNDWI)	29
2.3. Автоматизований індекс вилучення води (AWEI)	31
2.4. Water Index 2015 (WI2015)	34
Висновок до розділу 2	37
Список використаних джерел до розділу 2	38
РОЗДІЛ III. АВТОМАТИЧНЕ ОЦИФРУВАННЯ ГІДРОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З ДОПОМОГОЮ QGIS 3.34	41
3.1. Аналіз програмного інструментарію для побудови цифрової моделі рельєфу.	41
3.2. Отримання даних дистанційного зондування землі з допомогою використання платформи EO Browser	43
3.3. Автоматичне оцифрування та ідентифікація ділянки річки Прут з допомогою індексів ідентифікації водних об'єктів	46
3.3.1. Ідентифікація водного тіла річки Прут з допомогою індекса Normalized Difference Water Index (NDWI)	50
3.3.2. Ідентифікація водного тіла річки Прут з допомогою індекса Modified NDWI (MNDWI)	55
3.3.3. Ідентифікація водного тіла річки Прут з допомогою Автоматизованого індексу вилучення води (AWEI)	59
3.3.4. Ідентифікація водного тіла річки Прут з допомогою Water Index 2015 (WI2015)	62
Висновок до розділу 3	66
Список використаних джерел до розділу 3	67
ВИСНОВКИ	68

Вступ

Водні ресурси є одним із найважливіших компонентів природного середовища, які забезпечують життєдіяльність екосистем та людства. Ефективне управління та моніторинг водних об'єктів стають все більш актуальними у зв'язку з кліматичними змінами, зростанням антропогенного навантаження та необхідністю збереження екологічного балансу. Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) та технології дистанційного зондування Землі відкривають нові можливості для дослідження та картографування водних ресурсів з високою точністю та оперативністю.

Одним із перспективних напрямів є напівавтоматичне цифрове картографування водних об'єктів із використанням спектральних індексів, що дозволяють ефективно виділяти водну поверхню на супутникових знімках. Спектральні індекси, такі як NDWI (Normalized Difference Water Index), MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), AWEI (Automated Water Extraction Index) та WI2015 (Water Index 2015), широко використовуються для ідентифікації водних тіл, але їх ефективність може варіюватися залежно від характеристик місцевості та умов знімання.

Програмне забезпечення QGIS 3.34, як потужний інструмент з відкритим вихідним кодом, надає широкі можливості для обробки супутникових знімків, розрахунку спектральних індексів та автоматичного оцифрування водних об'єктів. Використання QGIS у поєднанні з даними супутникових місій, таких як Sentinel-2 L2A, дозволяє здійснювати детальний аналіз водних ресурсів навіть у віддалених та важкодоступних регіонах.

Метою даної роботи є дослідження та застосування сучасних методів напівавтоматичного цифрового картографування водних об'єктів з використанням спектральних індексів NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015 у програмному середовищі QGIS 3.34.

Об'єктом дослідження виступає водна поверхня ділянка річки Прут між селами Бояни та Маршинці.

Предметом дослідження є методи напівавтоматичного цифрового картографування водних об'єктів з використанням зазначених спектральних

індексів у програмному середовищі QGIS 3.34. Особлива увага дослідження приділяється дослідженню ефективності цих індексів для точного виділення водної поверхні річки Прут та визначенню найбільш придатних методів для моніторингу гідрологічних об'єктів у сільській місцевості.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі завдання дослідження:

1. Провести аналіз сучасних методів напівавтоматичного цифрового картографування водних об'єктів. Вивчити наукові підходи та технології, що використовуються для ідентифікації та моніторингу водних тіл за допомогою дистанційного зондування та ГІС.
2. Дослідити та порівняти спектральні індекси для ідентифікації водної поверхні (NDWI, MNDWI, AWEI, WI2015). Проаналізувати принципи роботи кожного індексу, їх переваги та обмеження в різних умовах.
3. Застосувати програмне забезпечення QGIS 3.34 для обробки супутникових знімків та розрахунку індексів. Виконати попередню обробку даних, розрахувати спектральні індекси та підготувати дані для подальшого аналізу.
4. Виконати автоматичне оцифрування та ідентифікацію водної поверхні річки Прут між селами Бояни та Маршинці. Застосувати розраховані індекси для виділення водного дзеркала та створення векторних шарів водних об'єктів.
5. Оцінити ефективність різних спектральних індексів та надати рекомендації щодо їх використання для моніторингу водних об'єктів. Порівняти результати, отримані за допомогою різних індексів, та визначити найбільш придатні методи для умов сільської місцевості.

Актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення ефективності та точності моніторингу водних ресурсів, що є важливим для сталого розвитку регіонів, запобігання негативним екологічним наслідкам та забезпечення раціонального використання водних ресурсів. Використання сучасних ГІС-технологій та методів дистанційного зондування дозволяє

отримувати актуальну інформацію про стан водних об'єктів з мінімальними затратами часу та ресурсів.

Наукова новизна роботи полягає в комплексному аналізі ефективності спектральних індексів NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015 для ідентифікації водної поверхні у конкретних умовах досліджуваної території. Результати дослідження сприятимуть вдосконаленню методик цифрового картографування водних об'єктів та можуть бути використані для інших регіонів з подібними характеристиками.

Практичне значення роботи полягає в розробці рекомендацій щодо вибору оптимальних методів та інструментів для моніторингу гідрологічних об'єктів у сільській місцевості. Отримані результати можуть бути використані органами управління водними ресурсами, екологічними службами та іншими зацікавленими сторонами для покращення управління водними ресурсами та планування територій.

Таким чином, дана робота спрямована на поглиблення розуміння можливостей та обмежень сучасних методів напівавтоматичного цифрового картографування водних об'єктів та їх практичне застосування для підвищення ефективності управління водними ресурсами.

РОЗДІЛ І. ЦИФРОВЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1. Сучасні напрями цифрового картографування водних об'єктів

Цифрове картографування водних об'єктів є важливим інструментом для моніторингу та управління водними ресурсами. Сучасні технології дистанційного зондування та геоінформаційні системи (ГІС) дозволяють отримувати високоточні дані про водні тіла, їхні зміни та вплив на навколишнє середовище.

За останні десятиліття спостерігається значний прогрес у використанні супутникових даних для картографування водних об'єктів. За словами Donchyts та співавторів (2016), використання даних Landsat дозволило створити глобальну карту висот з роздільною здатністю 30 м, що сприяє покращенню розуміння гідрологічних процесів [1].

"Цифрові моделі висот, отримані з супутникових знімків, відкривають нові можливості для детального аналізу водних ресурсів та їхнього впливу на екосистеми" (Donchyts et al., 2016) [1].

Сучасні напрями цифрового картографування водних об'єктів включають:

- Використання високороздільних супутникових знімків: Супутники Sentinel-2, Landsat 8 та інші надають дані з роздільною здатністю до 10 м, що дозволяє детально картографувати водні об'єкти [2].
- Розробка нових індексів водності: Покращені індекси, такі як Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), підвищують точність виявлення водних тіл на супутникових знімках [3].
- Автоматизація процесів обробки даних: Використання машинного навчання та штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання та класифікації водних об'єктів [4].

Згідно з дослідженням Pekel та співавторів (2016), високороздільне картографування поверхневих вод дозволяє відслідковувати довгострокові зміни водних ресурсів на глобальному рівні [2]. Це є критично важливим для розуміння впливу кліматичних змін та людської діяльності на водні екосистеми.

"Моніторинг поверхневих вод у високій роздільній здатності забезпечує безпрецедентні можливості для аналізу динаміки водних ресурсів" (Pekel et al., 2016) [2].

Інтеграція ГІС та дистанційного зондування є ще одним ключовим напрямом. Поєднання цих технологій дозволяє створювати детальні моделі водних об'єктів, аналізувати їхні просторові та часові зміни, а також моделювати потенційні сценарії розвитку подій [4]

Наприклад, Mueller та ін. (2016) використовували 25 років даних Landsat для картографування водних спостережень в Австралії, що дало змогу оцінити вплив кліматичних явищ та управління водними ресурсами [5].

"Довгостроковий аналіз супутникових даних надає цінну інформацію про тенденції та варіабельність водних об'єктів" (Mueller et al., 2016) [5].

Сучасні технології також дозволяють використовувати безпілотні літальні апарати (БПЛА) для детального картографування малих водних об'єктів та прибережних зон [6]. Це особливо корисно для регіонів, де супутникові дані мають обмеження через хмарність або інші фактори.

Хмарні обчислення та великі дані відіграють важливу роль у сучасному цифровому картографуванні. Платформи, такі як Google Earth Engine, надають можливість обробляти та аналізувати великі обсяги супутникових даних у глобальному масштабі [7].

Загалом, сучасні напрями цифрового картографування водних об'єктів спрямовані на підвищення точності, оперативності та доступності даних для широкого кола користувачів. Це сприяє покращенню управління водними ресурсами та прийняттю обґрунтованих рішень у сфері екології та гідрології.

1.2. Дистанційне зондування Землі як інструмент виявлення водних тіл

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є одним із найважливіших інструментів сучасної геоінформатики та картографії. Воно дозволяє отримувати оперативну та точну інформацію про поверхню Землі без

безпосереднього контакту з об'єктами дослідження. Особливо значущим є використання ДЗЗ для виявлення та моніторингу водних тіл, що має ключове значення для управління водними ресурсами, екологічного моніторингу та планування територій.

Дистанційне зондування базується на вимірюванні та аналізі електромагнітного випромінювання, яке відбивається або випромінюється об'єктами на поверхні Землі. Супутники та повітряні платформи обладнані датчиками, які реєструють це випромінювання в різних спектральних діапазонах. Це дозволяє отримувати багатоспектральні зображення, що містять інформацію про фізичні та хімічні властивості об'єктів [8].

Вода має характерні спектральні властивості, що відрізняють її від інших природних об'єктів. У видимому та інфрачервоному діапазонах спектру вода поглинає більшу частину випромінювання, що призводить до низьких значень відбивної здатності. Це використовується для ідентифікації водних об'єктів на супутникових знімках шляхом аналізу спектральних характеристик [9].

Багатоспектральні супутники, такі як Landsat, Sentinel-2 та інші, надають можливість аналізувати відбивну здатність поверхні в різних спектральних діапазонах. Це дозволяє використовувати різні спектральні індекси для виявлення водних тіл, наприклад, NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015 [10].

У міських районах виявлення водних тіл стає складнішим через наявність штучних покриттів, таких як асфальт, бетон та інші непроникні поверхні. Згідно з дослідженням Венга (2012), дистанційне зондування непроникних поверхонь в міських територіях вимагає спеціальних методів та підходів [11]. Вода в таких умовах може бути замаскована або змішана з іншими об'єктами, що ускладнює її ідентифікацію.

"Виявлення водних тіл у міських середовищах потребує високої спектральної та просторової роздільної здатності, а також використання удосконалених алгоритмів класифікації" (Weng, 2012) [11].

Переваги використання ДЗЗ для виявлення водних тіл

1. Оперативність: Супутникові дані можуть бути отримані з регулярними інтервалами, що дозволяє здійснювати моніторинг змін водних об'єктів у часі.

2. Велика площа охоплення: ДЗЗ забезпечує доступ до даних про великі території, включаючи важкодоступні регіони.

3. Багатоспектральний аналіз: Використання різних спектральних діапазонів підвищує точність ідентифікації водних тіл.

Методичні підходи до виявлення водних тіл

Основні методи виявлення водних об'єктів за допомогою ДЗЗ включають:

- Спектральні індекси: Розрахунок індексів, таких як NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015, для підсилення контрасту між водою та іншими об'єктами³.
- Класифікація зображень: Використання алгоритмів класифікації, таких як максимальна правдоподібність, дерева рішень та нейронні мережі.
- Аналіз текстури та форми: Додаткові параметри для підвищення точності в складних умовах.

Роль сучасних супутникових місій

Супутники нового покоління, такі як Sentinel-2, надають дані з високою просторовою (до 10 м) та спектральною роздільною здатністю. Це відкриває нові можливості для детального картографування водних об'єктів, особливо з використанням індексів водності, розроблених для цих даних [12].

Дистанційне зондування Землі є потужним інструментом для виявлення та моніторингу водних тіл. Використання багатоспектральних даних, сучасних індексів водності та удосконалених методів обробки зображень сприяє підвищенню точності картографування водних об'єктів. Це має важливе значення для управління водними ресурсами, екологічного моніторингу та планування територій.

1.3. Методи ідентифікації водних об'єктів на космічних знімках

Ідентифікація водних об'єктів на космічних знімках є ключовим елементом у дослідженнях гідрології, екології та управління водними

ресурсами. Сучасні методи дистанційного зондування Землі дозволяють ефективно виявляти та моніторити водні тіла за допомогою спектрального аналізу зображень, отриманих із супутників. У цьому підрозділі розглядаються основні методи ідентифікації водних об'єктів, зосереджуючись на спектральних індексах та алгоритмах обробки даних.

Вода має унікальні спектральні характеристики, що відрізняють її від інших природних об'єктів. У видимому діапазоні спектру вода поглинає більшу частину світла, особливо в червоному та інфрачервоному діапазонах, що призводить до низьких значень відбивної здатності. Це робить можливим використання багатоспектральних даних для виявлення водних тіл шляхом аналізу їх спектральних відгуків.

Normalized Difference Water Index (NDWI)

Першим широко використовуваним індексом для виділення водних об'єктів став Normalized Difference Water Index (NDWI), запропонований МакФітерсом у 1996 році. NDWI розраховується за формулою:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Де:

- Green — відбивна здатність у зеленому спектральному діапазоні.
- NIR — відбивна здатність у близькому інфрачервоному діапазоні.

NDWI підсилює сигнали від водних об'єктів і зменшує вплив рослинності та ґрунтів. Однак, як зазначає Ху (2006), цей індекс може бути неефективним у деяких умовах через накладання спектральних характеристик води та забудованих територій [3].

Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)

Для подолання обмежень NDWI був розроблений Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). Ху (2006) запропонував замінити близький інфрачервоний діапазон (NIR) на перший короткохвильовий інфрачервоний діапазон (SWIR1):

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1}$$

Ця модифікація підвищує контрастність між водою та забудованими територіями, що дозволяє більш точно ідентифікувати водні об'єкти в міських районах.

"MNDWI показав вищу ефективність у виділенні водних об'єктів, особливо в умовах складного ландшафту та наявності штучних покриттів" (Ху, 2006) [3].

Automated Water Extraction Index (AWEI)

Feyisa та ін. (2014) розробили Automated Water Extraction Index (AWEI), спрямований на автоматизацію процесу виділення водних об'єктів та зменшення впливу тіней і темних об'єктів:

- AWEI_{nsh} (Non-Shadow):

$$AWEI_{nsh} = 4 \times (Green - SWIR1) - (NIR + 2 \times SWIR2)$$

-

AWEI_{sh} (Shadow):

$$AWEI_{sh} = Blue + 2.5 \times Green - 1.5 \times (NIR + SWIR1) - 0.25 \times SWIR2$$

Де:

- Blue — відбивна здатність у синьому спектральному діапазоні.
- SWIR2 — відбивна здатність у другому короткохвильовому інфрачервоному діапазоні.

AWEI ефективно відокремлює воду від тіней та темних об'єктів, що часто є проблемою при використанні інших індексів [13].

"AWEI демонструє високий рівень автоматизації та точності у виділенні водних об'єктів, мінімізуючи вплив тіней та складних умов освітлення" (Feyisa et al., 2014) [13].

Як було згадано раніше, WI2015 є сучасним індексом, що підвищує точність виявлення водних об'єктів шляхом використання комбінації видимих та інфрачервоних діапазонів:

$$WI_{2015} = \frac{\text{Green} + \text{Red}}{\text{NIR} + \text{SWIR1}}$$

Цей індекс дозволяє більш ефективно відокремлювати воду від рослинності та ґрунтів, особливо в умовах високої мутності води [10].

Порівняння методів та їх ефективність

Кожен із зазначених індексів має свої переваги та обмеження. Вибір конкретного методу залежить від умов знімання, характеристик місцевості та цілей дослідження.

- NDWI добре підходить для загального виявлення водних об'єктів, але може бути неефективним у міських районах.
- MNDWI підвищує точність у міських та забудованих територіях.
- AWEI спеціально розроблений для мінімізації впливу тіней та темних об'єктів.
- WI2015 забезпечує високу точність в умовах складного ландшафту та різної мутності води.

Дослідження показали, що комбінування кількох індексів або використання їх у поєднанні з іншими методами, такими як класифікація на основі об'єктів, може підвищити загальну точність ідентифікації водних об'єктів².

Сучасні геоінформаційні системи, такі як QGIS 3.34, надають інструменти для розрахунку цих індексів та автоматизації процесу виділення водних об'єктів. Використання растрового калькулятора дозволяє швидко обчислити необхідні індекси, а функції класифікації та векторизації допомагають у подальшому аналізі даних.

Виклики та обмеження

- Атмосферні умови: Хмарність, туман та інші атмосферні явища можуть впливати на якість знімків та точність індексів.
- Сезонні зміни: Рівень води та характеристики поверхні можуть змінюватися в залежності від сезону, що впливає на результати аналізу.
- Спектральне накладання: Деякі об'єкти, такі як вологий ґрунт або тінь, можуть мати спектральні характеристики, схожі на воду.

Перспективи розвитку методів

Розвиток технологій дистанційного зондування та збільшення доступності високороздільних супутникових даних відкривають нові можливості для вдосконалення методів ідентифікації водних об'єктів. Поєднання спектральних індексів з методами машинного навчання та штучного інтелекту може значно підвищити точність та автоматизацію процесів.

Методи ідентифікації водних об'єктів на космічних знімках є критично важливими для ефективного управління водними ресурсами та екологічного моніторингу. Розвиток спектральних індексів, таких як NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015, а також удосконалення алгоритмів обробки даних сприяють підвищенню точності та ефективності цих методів. Подальші дослідження та інновації в цій галузі мають потенціал для значного внеску в розуміння та збереження водних екосистем.

1.4. Джерела даних для цифрового картографування водних об'єктів

1.4.1. Супутникові знімки Sentinel-2

Супутникова місія Sentinel-2 є ключовим компонентом програми Європейського Союзу з моніторингу навколишнього середовища та безпеки (Copernicus). Запущена Європейським космічним агентством (ESA), ця місія забезпечує високу просторову та спектральну роздільну здатність, що робить її незамінним джерелом даних для цифрового картографування водних об'єктів.

Система Sentinel-2 складається з двох ідентичних супутників Sentinel-2A та Sentinel-2B, які забезпечують покриття земної поверхні кожні 5 днів при екваторі. Кожен супутник оснащений багатоспектральним інструментом (MSI), який реєструє відбивну здатність у 13 спектральних діапазонах, що охоплюють видимий, ближній інфрачервоний (NIR) та короткохвильовий інфрачервоний (SWIR) діапазони.

Основні параметри MSI:

- Просторова роздільна здатність: 10 м, 20 м та 60 м в залежності від спектрального діапазону.

- Спектральні діапазони:
 - 4 бенди з роздільною здатністю 10 м (B2 - синій, B3 - зелений, B4 - червоний, B8 - NIR).
 - 6 бендів з роздільною здатністю 20 м (B5, B6, B7 - червоний край; B8A - NIR вузький; B11, B12 - SWIR).
 - 3 бенди з роздільною здатністю 60 м (B1 - аерозолі, B9 - водяна пара, B10 - SWIR для виявлення перистих хмар).

Як зазначає Drusch та ін. (2012), *Sentinel-2 забезпечує високу частоту повторного відвідування та просторову роздільну здатність, необхідну для моніторингу наземних екосистем*"[12].

Переваги Sentinel-2 для досліджень водних об'єктів

1. Висока просторова роздільна здатність: Роздільна здатність 10 м дозволяє детально картографувати водні об'єкти, включаючи малі річки та озера.
2. Широкий спектральний охоплення: Наявність бендів у видимому та інфрачервоному діапазонах сприяє точному виявленню водних тіл за допомогою спектральних індексів, таких як NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015.
3. Висока частота повторного відвідування: Період повторного відвідування у 5 днів забезпечує оперативний моніторинг змін водних ресурсів, що важливо для виявлення сезонних та екстремальних подій.
4. Безкоштовний доступ до даних: Політика відкритого доступу до даних Sentinel-2 дозволяє широкому колу дослідників та фахівців використовувати ці дані без обмежень.

Використання спектральних бендів Sentinel-2 у поєднанні з індексом WI2015 дозволяє підвищити точність виявлення водних об'єктів. Завдяки високій спектральній роздільній здатності, бенди B3 (зелений), B4 (червоний), B8 (NIR) та B11 (SWIR1) можуть бути ефективно використані для розрахунку WI2015:

$$WI_{2015} = \frac{B3 \text{ (Зелений)} + B4 \text{ (Червоний)}}{B8 \text{ (NIR)} + B11 \text{ (SWIR1)}}$$

Це сприяє більш чіткому розмежуванню водних тіл від навколишніх поверхонь, особливо в умовах складного ландшафту та змінних оптичних властивостей води.

Приклад використання Sentinel-2 для картографування водних об'єктів

Sentinel-2 активно використовується для моніторингу змін площі водних об'єктів, виявлення затоплень та аналізу якості води. Наприклад, дослідження показали, що дані Sentinel-2 можуть бути використані для оцінки ступеня евтрофікації озер шляхом аналізу концентрації хлорофілу-а.

Взаємодія з геоінформаційними системами

Дані Sentinel-2 легко інтегруються з ГІС-платформами, такими як QGIS 3.34, що дозволяє проводити складний аналіз та моделювання. Завдяки високій сумісності форматів даних та наявності спеціалізованих плагінів, обробка та інтерпретація супутникових знімків стає доступною навіть для користувачів з базовим рівнем знань.

Хоча Sentinel-2 надає значні можливості, існують певні виклики, пов'язані з атмосферними впливами, такими як хмарність та аерозолі, які можуть впливати на якість зображень. Проте, наявність бендів для корекції атмосфери та методів попередньої обробки даних дозволяє мінімізувати ці впливи.

Як зазначено в роботі Drusch та ін. (2012), "Sentinel-2 є важливим кроком вперед у забезпеченні даними високої якості для широкого спектра застосувань у наземному моніторингу" [12].

Супутникові знімки Sentinel-2 є потужним інструментом для цифрового картографування водних об'єктів. Їх високі технічні характеристики, поєднані з доступністю та можливістю інтеграції з сучасними ГІС-технологіями, роблять їх незамінними для дослідників та фахівців у галузі гідрології, екології та управління водними ресурсами.

1.4.2. Платформа EO Browser як інструмент отримання даних

Платформа EO Browser від Sentinel Hub є потужним веб-інструментом, який надає доступ до широкого спектру супутникових знімків різних місій, включаючи Sentinel-2, Landsat 8 та інших. Ця платформа дозволяє дослідникам та фахівцям оперативно отримувати необхідні дані для цифрового картографування водних об'єктів без потреби в складному програмному забезпеченні або спеціальних навичках програмування.

EO Browser поєднує в собі простий інтерфейс користувача з потужними функціональними можливостями. Серед ключових переваг платформи:

- Доступ до різноманітних супутникових даних: Підтримка декількох супутникових місій забезпечує широкий вибір знімків з різною просторовою та спектральною роздільною здатністю.
- Оперативність: Можливість отримувати найсвіжіші знімки завдяки регулярному оновленню даних.
- Інтерактивний інтерфейс: Зручні інструменти для навігації по карті, масштабування та вибору області інтересу.
- Аналіз даних онлайн: Вбудовані інструменти для обробки зображень, розрахунку спектральних індексів та візуалізації результатів.

Для отримання супутникових знімків за допомогою EO Browser слід виконати кілька кроків. Спершу відкрийте веб-сайт EO Browser за посиланням <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>. Хоча багато функцій доступні без реєстрації, створення безкоштовного облікового запису надає додаткові можливості, такі як збереження налаштувань та завантаження даних у високій роздільній здатності. Для вибору області інтересу використовуйте карту для навігації до потрібного регіону, а інструменти масштабування та панорамування допоможуть точно визначити область дослідження.

Далі в правому верхньому куті інтерфейсу оберіть потрібний супутник, наприклад, Sentinel-2, або інші місії залежно від потреб дослідження. Потім встановіть діапазон дат для пошуку доступних знімків і використовуйте фільтри для відбору зображень за критеріями, такими як хмарність.

Перегляньте доступні зображення у списку результатів, натисніть на знімок, щоб відкрити його у повноекранному режимі, і скористайтесь вбудованими інструментами для зміни комбінації бендів та розрахунку спектральних індексів, таких як NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015. Для розрахунку індексу WI2015 можна ввести власний скрипт у розділі "Custom script", що дозволить виділити водні об'єкти з урахуванням специфіки цього індексу.

Після налаштування зображення натисніть кнопку "Download" для завантаження знімка, обравши формат файлу, просторову роздільну здатність та інші параметри експорту.

Поради щодо використання EO Browser передбачають кілька простих, але важливих кроків для оптимізації роботи. Для ефективного пошуку знімків рекомендується використовувати фільтр хмарності, щоб відсіяти знімки з високим рівнем хмарності, які можуть заважати аналізу. Якщо ви зареєструєтесь на платформі, то матимете можливість зберігати власні налаштування конфігурацій, що дозволить швидко повертатися до них у майбутньому. Крім того, EO Browser надає базові аналітичні функції, які дозволяють проводити попередній аналіз даних прямо в браузері, що дуже зручно для огляду перед завантаженням зображень.

EO Browser спрощує процес отримання та попередньої обробки супутникових знімків, що є критичним для досліджень водних об'єктів. Завдяки можливості швидкого доступу до актуальних даних та інтеграції з інструментами аналізу, платформа стає незамінним помічником для фахівців у галузі гідрології та екології.

Використання EO Browser у поєднанні з ГІС-платформами, такими як QGIS 3.34, дозволяє проводити детальний аналіз та картографування водних об'єктів з урахуванням сучасних методик та індексів.

Платформа EO Browser є ефективним інструментом для отримання та попереднього аналізу супутникових даних. Її можливості сприяють підвищенню оперативності та точності цифрового картографування водних

об'єктів, що має важливе значення для управління водними ресурсами та екологічного моніторингу [14].

1.5. Використання QGIS 3.34 для обробки та аналізу супутникових знімків

QGIS 3.34 є сучасною геоінформаційною системою з відкритим вихідним кодом, яка надає потужні інструменти для обробки та аналізу супутникових знімків. Завдяки своїй гнучкості та широкому набору функцій, QGIS стає незамінним інструментом для дослідників та фахівців у галузі цифрового картографування водних об'єктів.

Основні можливості QGIS 3.34:

1. Підтримка різних форматів даних: QGIS дозволяє працювати з широким спектром растрових та векторних форматів, включаючи GeoTIFF, Shapefile, KML та інші. Це забезпечує легку інтеграцію даних з різних джерел та платформ [15].

2. Інтеграція з GDAL: Вбудована підтримка бібліотеки GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) надає можливість виконувати складні операції з геопросторовими даними, включаючи перетворення форматів та перепроекціювання [16].

3. Растровий калькулятор: Цей інструмент дозволяє виконувати математичні операції над растровими шарами, що є особливо корисним при розрахунку спектральних індексів, таких як NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015 [17].

4. Підтримка плагінів: QGIS має розширювану архітектуру з великою кількістю плагінів, які додають додаткові функціональні можливості. Наприклад, Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) спрощує процес класифікації супутникових знімків [18].

5. Інструменти візуалізації: Різноманітні засоби для налаштування символіки та створення картографічних продуктів дозволяють ефективно представляти результати аналізу [15].

Процес обробки супутникових знімків у QGIS 3.34:

1. Імпорт даних. Першим кроком є завантаження супутникових знімків у QGIS. Для цього використовується функція «Add Raster Layer», яка дозволяє імпортувати дані у форматі GeoTIFF або інших підтримуваних форматах. Важливо переконатися, що всі необхідні спектральні бенди завантажені та правильно відображаються [15].

2. Попередня обробка. Перед аналізом рекомендується виконати перепроекціювання даних до бажаної системи координат, наприклад, WGS 84 / UTM zone 35N. Це забезпечить коректність подальших просторових операцій. Для цього використовується інструмент «Перепроекціювання» [16].

3. Розрахунок спектральних індексів. За допомогою «Растрового калькулятора» можна розрахувати спектральні індекси. Наприклад, для розрахунку індексу WI2015 використовується формула:

$$WI2015 = \frac{B3 \text{ (Зелений)} + B4 \text{ (Червоний)}}{B8 \text{ (NIR)} + B11 \text{ (SWIR1)}}$$

Ця формула вводиться в растровий калькулятор, після чого отримується новий растр з значеннями індексу [10].

4. Класифікація зображень. Після розрахунку індексу можна виконати класифікацію для виділення водних об'єктів. Для цього встановлюються порогові значення, які дозволяють відокремити воду від інших типів поверхні. Інструмент «Рекласифікація» допомагає автоматизувати цей процес [17].

5. Векторизація результатів. Для подальшого аналізу та зручності представлення результати класифікації можуть бути перетворені у векторний формат. Інструмент «Полігонізувати (растр-вектор)» дозволяє конвертувати растровий шар у полігони. Це дає можливість виконувати просторові запити та аналізувати характеристики водних об'єктів [15].

6. Аналіз та візуалізація. Використовуючи інструменти QGIS, можна вимірювати площу, периметр та інші параметри векторизованих водних

об'єктів. Налаштування стилів відображення та створення картографічних продуктів сприяють ефективній візуалізації результатів дослідження [15].

Переваги використання QGIS 3.34 полягають у кількох ключових аспектах. По-перше, це програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом, що робить його безкоштовним і доступним для широкого кола користувачів. Крім того, QGIS відрізняється гнучкістю та розширюваністю: завдяки численним плагінам і можливості написання скриптів на Python, його функціональність можна легко адаптувати до потреб користувача. Нарешті, активна спільнота користувачів і розробників сприяє швидкому вирішенню проблем і постійному вдосконаленню програми, що робить QGIS надійним інструментом для роботи з геопросторовими даними [16, 18].

Рекомендації щодо використання інструментів для аналізу зображень включають кілька важливих кроків. Перш за все, перед розрахунком спектральних індексів рекомендується виконати атмосферну корекцію зображень, щоб підвищити точність результатів, для чого SCP надає відповідні інструменти. Окрім цього, порогові значення для класифікації можуть змінюватися залежно від регіону та умов знімання, тому важливо виконувати калібрування на основі місцевих даних, що забезпечить більш точні результати. Нарешті, використання моделей та пакетної обробки в QGIS значно підвищує ефективність роботи, оскільки дозволяє автоматизувати повторювані задачі та суттєво скоротити час на аналіз [10, 15, 18].

QGIS 3.34 є потужним інструментом для обробки та аналізу супутникових знімків, особливо в контексті цифрового картографування водних об'єктів. Його функціональні можливості, поєднані з гнучкістю та підтримкою спільноти, роблять його цінним ресурсом для дослідників та практиків у галузі геоінформатики.

Висновок до розділу 1.

В 1 розділі нами було проведено детальний аналіз сучасних напрямів цифрового картографування водних об'єктів, підкреслено важливість

дистанційного зондування Землі як ключового інструменту для виявлення та моніторингу водних тіл. Розглянуто основні методи ідентифікації водних об'єктів на космічних знімках, зокрема використання спектральних індексів, таких як NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015, та алгоритмів обробки даних.

Вивчено джерела даних для цифрового картографування водних об'єктів, особливо акцентовано на супутникових знімках Sentinel-2, які надають високу просторову та спектральну роздільну здатність, що є критичним для детального аналізу водних тіл. Платформа EO Browser була проаналізована як ефективний інструмент для отримання та попереднього аналізу супутникових даних, що спрощує доступ до актуальної інформації та забезпечує інтерактивність у роботі з даними.

Також було досліджено можливості програмного забезпечення QGIS 3.34 для обробки та аналізу супутникових знімків. Встановлено, що QGIS є потужним інструментом для цифрового картографування водних об'єктів завдяки своїй гнучкості, підтримці різних форматів даних, інтеграції з бібліотекою GDAL та наявності розширених інструментів для аналізу зображень.

Проведений аналіз показав, що поєднання сучасних методів дистанційного зондування, доступних джерел даних та потужних ГІС-інструментів дозволяє ефективно і точно ідентифікувати та картографувати водні об'єкти. Це має важливе значення для управління водними ресурсами, екологічного моніторингу та планування територій. Використання інструментів, таких як QGIS у поєднанні з даними Sentinel-2 та можливостями EO Browser, сприяє підвищенню точності та оперативності в дослідженнях водних ресурсів, що є критичним у контексті змін клімату та антропогенного впливу на навколишнє середовище.

Список використаних джерел до розділу 1

1. Donchyts, G., Schellekens, J., Winsemius, H., Eisemann, E., & van de Giesen, N. (2016). Global 30m Height Above the Nearest Drainage Map Using Landsat Data. *Remote Sensing*, 8(9), 701. <https://doi.org/10.3390/rs8090701>
2. Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
3. Xu, H. (2006). Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
4. Huang, C., Chen, Y., Zhang, S., & Wu, J. (2018). Detecting, Extracting, and Monitoring Surface Water From Space Using Optical Sensors: A Review. *Reviews of Geophysics*, 56(2), 333–360. <https://doi.org/10.1029/2018RG000598>
5. Mueller, N., et al. (2016). Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia. *Remote Sensing of Environment*, 174, 341–352. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.003>
6. Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22–36. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>
7. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
8. Черваньов, О. І. (Ред.). (2010). *Ландшафтне дистанційне зондування*. Київ: ВПЦ "Київський університет".
9. Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall. <https://archive.org/details/remotesensingofe0000jens>

10. Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>
11. Weng, Q. (2012). Remote Sensing of Impervious Surfaces in the Urban Areas: Requirements, Methods, and Trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.030>
12. Drusch, M., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
13. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A New Technique for Surface Water Mapping Using Landsat Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
14. Sentinel Hub. (n.d.). *EO Browser User Guide*. Retrieved from <https://sentinelhub.com/explore/eobrowser>
15. QGIS Development Team. (2020). *QGIS User Guide*. Retrieved from https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/user_manual/
16. Graser, A. (2019). *Learning QGIS 3*. Packt Publishing. https://books.google.com/books/about/Learning_QGIS.html?id=rUXiCwAAQBAJ
17. Congalton, R. G., & Green, K. (2019). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780429052729/assessing-accuracy-remotely-sensed-data-russell-congalton-kass-green>
18. Luca, C. (2020). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation*. Retrieved from <https://fromgistors.blogspot.com/p/semi-automatic-classification-plugin.html>

РОЗДІЛ II. ІНДЕКСИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВОДНОЇ ПОВЕРХНІ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

2. 1. Normalized Difference Water Index (NDWI)

Normalized Difference Water Index (NDWI) або Нормалізований Різницевий Водний Індекс є одним із найпоширеніших спектральних індексів, що використовуються для виявлення та картографування водних об'єктів за допомогою супутникових знімків. Запропонований МакФітерсом у 1996 році, NDWI став основою для багатьох подальших досліджень у сфері дистанційного зондування водних ресурсів [1].

Формула розрахунку NDWI:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Де:

- Green – відбивна здатність у зеленому спектральному діапазоні.
- NIR – відбивна здатність у ближньому інфрачервоному спектральному діапазоні.

Призначення та принцип дії NDWI

NDWI спрямований на підсилення сигналу від водних об'єктів та зменшення впливу наземної рослинності та ґрунтів. У зеленому діапазоні вода має високу відбивну здатність, тоді як у ближньому інфрачервоному діапазоні вона поглинає більшу частину випромінювання. Це дозволяє використовувати різницю між цими двома діапазонами для ефективного виділення водних тіл.

Застосування NDWI

- Виявлення водних об'єктів: NDWI широко використовується для ідентифікації річок, озер, ставків та інших відкритих водних поверхонь на супутникових знімках-[2].
- Моніторинг змін водних ресурсів: Допомагає відстежувати сезонні та довгострокові зміни площі водних об'єктів, що важливо для управління водними ресурсами та екологічного моніторингу-[3].

- Оцінка повеней та затоплень: NDWI використовується для виявлення затоплених територій під час повеней, що сприяє швидкому реагуванню на надзвичайні ситуації [4].

Приклад розрахунку NDWI з використанням даних Sentinel-2

Супутники Sentinel-2 надають дані з високою просторовою та спектральною роздільною здатністю, що ідеально підходить для розрахунку NDWI. Використовуються наступні бенди:

- Green: Бенд 3 (B3) з роздільною здатністю 10 м.
- NIR: Бенд 8 (B8) з роздільною здатністю 10 м.

Формула для Sentinel-2:

$$NDWI = \frac{B3 - B8}{B3 + B8}$$

Обмеження та особливості NDWI

- Вплив рослинності: У деяких випадках NDWI може плутати вологу рослинність з водними об'єктами, оскільки обидва мають схожі спектральні характеристики в використовуваних діапазонах [5].
- Наявність шуму: Шум в даних або атмосферні впливи можуть знижувати точність індексу. Рекомендується виконувати попередню обробку зображень, включаючи атмосферну корекцію.

Порівняння з іншими індексами

NDWI став основою для подальших модифікацій, таких як MNDWI та інші індекси водності. Наприклад, Modified NDWI (MNDWI) замінює ближній інфрачервоний діапазон (NIR) на короткохвильовий інфрачервоний (SWIR) для покращення результатів в урбанізованих районах [6].

Практичні рекомендації щодо використання NDWI

- Калібрування порогових значень: Для різних регіонів та умов знімання оптимальні порогові значення NDWI можуть варіюватися. Важливо проводити калібрування на основі місцевих умов.
- Комбінація з іншими даними: Для підвищення точності рекомендується використовувати NDWI у поєднанні з іншими індексами або додатковими геопросторовими даними.

NDWI є простим у розрахунку та ефективним інструментом для виявлення водних об'єктів на супутникових знімках. Його застосування сприяє підвищенню точності картографування водних ресурсів та забезпечує цінну інформацію для управління та моніторингу навколишнього середовища.

2.2. Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)

Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), або Модифікований Нормалізований Різницевий Водний Індекс, був запропонований Ху (Xu) у 2006 році як удосконалення традиційного NDWI для більш точного виявлення водних об'єктів, особливо в урбанізованих районах [3].

Формула розрахунку MNDWI:

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1}$$

Де:

- Green — відбивна здатність у зеленому спектральному діапазоні.
- SWIR1 — відбивна здатність у першому короткохвильовому інфрачервоному діапазоні.

Удосконалення NDWI та переваги MNDWI

Основним обмеженням NDWI є те, що він може неправильно ідентифікувати забудовані території як водні об'єкти через схожість спектральних характеристик будівельних матеріалів у ближньому інфрачервоному діапазоні. MNDWI вирішує цю проблему, замінюючи ближній інфрачервоний діапазон (NIR) на короткохвильовий інфрачервоний (SWIR1), що значно зменшує вплив забудованих територій на результати індексу [3].

Переваги MNDWI [7,9]:

1. Підвищена точність виявлення водних об'єктів в урбанізованих районах: MNDWI ефективніше відокремлює водні об'єкти від забудованих територій, що є критичним у міських умовах.

2. Зменшення впливу рослинності та ґрунтів: Індекс знижує сигнал від рослинності та сухих ґрунтів, підвищуючи контраст між водою та іншими поверхнями.

3. Покращене виявлення мілководних та забруднених вод: MNDWI більш чутливий до змін у водних об'єктах з високою мутністю або забрудненням, що дозволяє краще їх ідентифікувати.

Застосування MNDWI

- Картографування водних ресурсів у міських територіях: MNDWI широко використовується для виявлення річок, озер та водосховищ у містах, де традиційні індекси можуть бути менш ефективними.

- Моніторинг змін водних об'єктів: Індекс допомагає відстежувати сезонні та довгострокові зміни площі водних тіл, що важливо для управління водними ресурсами.

- Виявлення зон затоплення та повеней: MNDWI використовується для ідентифікації затоплених територій під час повеней, що сприяє оперативному реагуванню на надзвичайні ситуації [8].

Приклад розрахунку MNDWI з використанням даних Sentinel-2

Для супутникових даних Sentinel-2 можна використовувати наступні бенди:

- Green: Бенд 3 (B3) — зелений спектральний діапазон.
- SWIR1: Бенд 11 (B11) — перший короткохвильовий інфрачервоний діапазон.

Формула для Sentinel-2:

$$\text{MNDWI} = \frac{B3 - B11}{B3 + B11}$$

Обмеження MNDWI

- Атмосферні впливи: Як і інші спектральні індекси, MNDWI може бути чутливим до атмосферних умов, тому рекомендується проводити атмосферну корекцію знімків [9].

- Роздільна здатність бендів: У деяких супутникових даних бенди Green та SWIR1 можуть мати різну просторову роздільну здатність, що вимагає попереднього ресемплінгу для коректного розрахунку індексу².

Порівняння з іншими індексами

У порівнянні з NDWI та іншими індексами, MNDWI демонструє кращу ефективність у виявленні водних об'єктів в умовах складного ландшафту та урбанізованих територій [3]. Це робить його більш надійним інструментом для застосування в міських середовищах.

MNDWI є удосконаленим індексом водності, який перевершує традиційний NDWI у ряді аспектів. Його використання дозволяє підвищити точність та надійність виявлення водних об'єктів, особливо в урбанізованих районах. Це робить MNDWI важливим інструментом для дослідників та фахівців у галузі дистанційного зондування та управління водними ресурсами.

2.3. Automated Water Extraction Index (AWEI)

Automated Water Extraction Index (AWEI) або Автоматизований Індекс Вилучення Води був розроблений Фейса та ін. у 2014 році для підвищення точності автоматизованого виявлення водних об'єктів на супутникових знімках¹. Цей індекс спрямований на мінімізацію впливу тіней, темних об'єктів та атмосферних умов, які можуть заважати точному ідентифікуванню водних тіл.

Формули розрахунку AWEI

AWEI має дві версії, призначені для різних умов:

1. AWEI_{nsh} (Non-Shadow Version):

$$AWEI_{nsh} = B2 + 2.5 * B3 - 1.5 * (B5 + B6) - 0.25 * B7$$

2. AWEI_{sh} (Shadow Version):

$$AWEI_{sh} = 4 * (B3 - B6) - (B5 + 2 * B7)$$

Де:

B2 — Blue (синій бенд),

B3 — Green (зелений бенд),

B5 — NIR (ближній інфрачервоний),

B6 — SWIR1 (короткохвильовий інфрачервоний 1),

B7 — SWIR2 (короткохвильовий інфрачервоний 2).

Призначення та переваги AWEI

Основна мета AWEI (Automated Water Extraction Index) полягає в усуненні хибнопозитивних результатів при виявленні водних об'єктів. Такі помилкові ідентифікації можуть виникати з декількох причин, основними з яких є:

- Тіні: Тіні від гір, будівель або хмар часто мають низькі значення відбивної здатності, які схожі на відбиття води. Через це тіні можуть помилково визначатися як вода.
- Темні об'єкти: Темні ґрунти, щільні ліси та інші подібні об'єкти також можуть бути ідентифіковані як вода через їхню схожість з водними сигналами.

AWEI вирішує ці проблеми шляхом використання спеціальних коефіцієнтів та комбінацій спектральних бендів, які підсилюють сигнал від води та приглушують ефект тіней і темних об'єктів. Завдяки цьому індексу водні об'єкти можна виділяти більш точно, навіть у складних середовищах.

Дослідження показують, що AWEI досягає високої точності виявлення водних об'єктів у різних умовах. Ось кілька прикладів:

- Урбанізовані території: AWEI ефективно відокремлює воду від забудованих територій, зменшуючи вплив відбиттів будівельних матеріалів, які можуть вводити в оману.
- Гірські райони: Завдяки здатності мінімізувати вплив тіней, AWEI добре підходить для місцевостей зі складним рельєфом, наприклад, гірських регіонів.

- Сезонні зміни: Індекс стабільно визначає водні об'єкти навіть в умовах сезонних змін рівня води та рослинного покриву. Це особливо корисно в дослідженнях, де важливо враховувати зміну сезонності, як-от в аналізі повеней.

Одним із прикладів використання AWEI є обробка даних Sentinel-2, де застосовуються спеціальні спектральні бенди для підсилення водного сигналу. Завдяки високій просторовій роздільній здатності даних Sentinel-2 (10 м) можна точно виявляти невеликі водні об'єкти, відокремлюючи їх від інших типів поверхонь навіть у густонаселених або гірських районах.

Для розрахунку AWEI з використанням супутникових даних Sentinel-2 застосовуються відповідні бенди:

- Blue: Бенд 2 (B2)
- Green: Бенд 3 (B3)
- NIR: Бенд 8 (B8)
- SWIR1: Бенд 11 (B11)
- SWIR2: Бенд 12 (B12)

AWEI (Automated Water Extraction Index) є потужним інструментом для автоматизованого виявлення водних об'єктів, але він має деякі обмеження:

Атмосферні умови: Хоча AWEI зменшує вплив атмосферних явищ, сильна хмарність все ще може заважати точному визначенню води, що вимагає попередньої обробки для зменшення такого впливу.

Різна роздільна здатність бендів: Деякі спектральні бенди можуть мати різну просторову роздільну здатність, тому перед аналізом їх потрібно привести до спільного масштабу [5].

У порівнянні з індексами NDWI (Normalized Difference Water Index) та MNDWI (Modified NDWI), AWEI демонструє вищу точність в умовах складного ландшафту та освітлення. Це робить його особливо надійним для автоматизованих систем, де важливо зменшити ручне втручання.

Вибір версії AWEI: Існують дві основні версії індексу – AWEI_nsh і AWEI_sh. Якщо тіні не є значною проблемою (наприклад, на рівнинних територіях або в умовах однорідного освітлення), краще використовувати AWEI_nsh. AWEI_sh більш підходить для місцевостей з вираженими тінями, таких як гірські райони.

Атмосферна корекція: Рекомендується виконувати атмосферну корекцію зображень перед застосуванням індексу для підвищення його точності та зменшення впливу сторонніх факторів.

Завдяки здатності мінімізувати вплив тіней та темних об'єктів, AWEI є надзвичайно цінним для широкого спектру застосувань, зокрема для моніторингу водних ресурсів та екологічного стану територій. Його ефективність особливо корисна в автоматизованих системах, де потрібен надійний метод для виявлення води без ручного втручання, що робить AWEI незамінним для гідрологів та екологів [5].

2.4. WI2015 (Water Index 2015)

WI2015 (Water Index 2015) є новим спектральним індексом, розробленим для покращення точності виявлення водних об'єктів на супутникових знімках. Цей індекс був запропонований Фішером, Фладом та Данагером у 2016 році в рамках їх дослідження методів автоматизованої класифікації води з використанням зображень Landsat¹.

Формула розрахунку WI2015:

$$WI2015 = \frac{Green + Red}{NIR + SWIR1}$$

Де:

B3 — Green (зелений бенд),

B4 — Red (червоний бенд),

B5 — NIR (ближній інфрачервоний),

B6 — SWIR1 (короткохвильовий інфрачервоний 1).

WI2015 (Water Index 2015) розроблений для підвищення контрастності між водними об'єктами та іншими типами поверхонь. Використовуючи

поєднання видимих та інфрачервоних діапазонів, індекс ефективно виділяє водні тіла, мінімізуючи вплив рослинності та забудованих територій. Це особливо важливо для регіонів зі складним ландшафтом і різноманітним покривом, де традиційні методи не завжди дають точні результати.

Дослідження Фішера та ін. (2016) порівняли ефективність WI2015 з іншими популярними водними індексами, такими як NDWI (Normalized Difference Water Index), MNDWI (Modified NDWI) та AWEI (Automated Water Extraction Index). Було виявлено, що WI2015 демонструє вищу точність в автоматизованому виділенні води, особливо в умовах зі змішаним покриттям та різною мутністю води. "WI2015 показав кращу ефективність у розрізненні водних об'єктів від навколишніх поверхонь, що робить його цінним інструментом для моніторингу водних ресурсів" (Fisher et al., 2016).

Практичне застосування WI2015:

- Автоматизоване картографування води: Завдяки високій точності, WI2015 використовується для автоматизованого виділення водних об'єктів із супутникових знімків, що спрощує картографування великих водних площ.
- Моніторинг змін водних ресурсів: Індекс допомагає відстежувати сезонні та довгострокові зміни у водних тілах, що є важливим для ефективного управління водними ресурсами.
- Дослідження повеней та затоплень: WI2015 виявляє зони затоплення під час повеней, що сприяє швидкому реагуванню на надзвичайні ситуації та дозволяє мінімізувати ризики.

WI2015 має певні переваги порівняно з традиційними водними індексами, такими як NDWI, MNDWI та AWEI. На відміну від них, WI2015 використовує комбінацію червоного та зеленого діапазонів у чисельнику формули, що підвищує його чутливість до водних об'єктів навіть у складних умовах, зокрема при наявності рослинності на водній поверхні або при різних рівнях мутності води. Це робить WI2015 більш адаптованим для умов, де інші індекси можуть показати меншу точність через взаємодію з покриттям чи особливості ландшафту.

Обмеження та рекомендації:

- Атмосферні впливи: Подібно до інших спектральних індексів, WI2015 може бути чутливим до атмосферних умов, таких як хмарність чи аерозольний вплив. Тому перед розрахунком індексу рекомендується виконувати атмосферну корекцію зображень.

- Поєднання з іншими методами: Для підвищення точності, особливо в умовах складного рельєфу, результати WI2015 можна комбінувати з іншими індексами або використовувати його в поєднанні з методами машинного навчання, що дозволяє покращити якість автоматизованого виділення води.

Дослідження показують, що WI2015 має високу точність виявлення водних об'єктів у різних середовищах, включаючи урбанізовані, гірські та сезонно змінні області. У порівнянні з індексами NDWI, AWEI та MNDWI, WI2015 продемонстрував більшу надійність і точність, що особливо важливо для автоматизованих систем, де мінімізація ручного втручання є критичною [3].

Практичні рекомендації для використання WI2015:

1. Вибір параметрів: Для оптимальних результатів рекомендується підбирати параметри обробки, враховуючи специфіку регіону, що досліджується, та наявність рослинності чи антропогенних впливів.

2. Атмосферна корекція: Попередня обробка зображень, включаючи атмосферну корекцію, може значно підвищити точність WI2015.

3. Комбінування з іншими індексами: Для складних умов використання WI2015 разом із NDWI або MNDWI може забезпечити більш точне виділення водних об'єктів, особливо у місцях з високою відбивною здатністю оточуючих поверхонь.

WI2015 є незамінним інструментом для моніторингу водних ресурсів, застосування під час проходження повеней та відстеження сезонних змін у водних тілах. Завдяки здатності точно виділяти воду серед різноманітних поверхонь, WI2015 широко використовується у гідрологічних дослідженнях і для екологічного моніторингу, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо охорони водних ресурсів [6].

Висновок до розділу 2

Нами проведено аналіз спектральних індексів, які широко застосовуються для ідентифікації водних об'єктів за допомогою даних дистанційного зондування Землі. Розглянули індекси - NDWI (Normalized Difference Water Index), MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index), AWEI (Automated Water Extraction Index) та WI2015 (Water Index 2015) - які є ключовими інструментами в сучасних гідрологічних дослідженнях та екологічному моніторингу. Детально проаналізували їх теоретичні основи, формули розрахунку, а також практичні аспекти застосування в різних умовах ландшафту та зйомки.

Індекс NDWI, запропонований МакФітерсом у 1996 році, базується на співвідношенні відбивної здатності в зеленому та ближньому інфрачервоному спектральних діапазонах. Він є ефективним для виявлення відкритих водних поверхонь, особливо в регіонах без значного рослинного покриву або антропогенного впливу. Проте, його застосування може бути обмеженим у районах з високою вологістю рослинності або заболоченими територіями, де схожі спектральні характеристики можуть призвести до хибнопозитивних результатів.

MNDWI був розроблений для подолання цих обмежень NDWI. Заміняючи ближній інфрачервоний діапазон на короткохвильовий інфрачервоний, MNDWI значно зменшує вплив рослинності та ґрунтів, що підвищує точність виявлення водних об'єктів. Це особливо актуально в урбанізованих районах, де будівельні матеріали та міські структури можуть ускладнювати ідентифікацію водних тіл. MNDWI демонструє вищу точність в таких умовах, забезпечуючи краще розрізнення між водою та іншими поверхнями.

AWEI спрямований на мінімізацію впливу тіней, темних об'єктів та атмосферних умов, які можуть заважати точному ідентифікуванню водних об'єктів. Використовуючи спеціальні коефіцієнти та комбінації спектральних бендів, AWEI підсилює сигнал від води та приглушує небажані ефекти. Це дозволяє більш точно визначати водні об'єкти в складних умовах освітлення та

ландшафту, таких як гірські райони або території зі значними перепадами рельєфу. AWEI є особливо цінним для автоматизованих систем моніторингу, де мінімізація ручного втручання є критичною.

Індекс WI2015 був розроблений для покращення точності виділення водних об'єктів в умовах змішаного покриття та різної мутності води. Використовуючи комбінацію червоного та зеленого спектральних діапазонів, WI2015 підвищує чутливість до водних об'єктів навіть у складних умовах, таких як наявність рослинності на водній поверхні або різні рівні мутності води. Це робить WI2015 цінним інструментом для моніторингу водних ресурсів, особливо в регіонах з різноманітним ландшафтом та екологічними умовами.

Таким чином, проведений нами аналіз не лише підсумовує існуючі знання про спектральні індекси для ідентифікації водних об'єктів, але й відкриває перспективи для подальших досліджень та вдосконалення методик. Це має важливе значення для розвитку гідрології, екології та суміжних наук, а також для практичних застосувань у сфері природокористування та охорони навколишнього середовища.

Список використаних джерел до розділу 2

1. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
2. Gao, B.-C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
3. Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
4. Acharya, T. D., Subedi, A., Lee, D. H., & Yang, I. T. (2018). Application of water indices in surface water change detection using Landsat imagery in Nepal. *Sensors*, 18(8), 2580. <https://doi.org/10.3390/s18082580>

5. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
6. Fisher, A., Flood, N., & Danaher, T. (2016). Comparing Landsat water index methods for automated water classification in eastern Australia. *Remote Sensing of Environment*, 175, 167–182. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.055>
7. Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. (2016). Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band. *Remote Sensing*, 8(4), 354. <https://doi.org/10.3390/rs8040354>
8. Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., & Hazini, S. (2014). Water feature extraction and change detection using multitemporal Landsat imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 4173–4189. <https://doi.org/10.3390/rs6054173>
9. Ji, L., Zhang, L., & Wylie, B. (2009). Analysis of dynamic thresholds for the normalized difference water index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(11), 1307–1317. <https://doi.org/10.14358/PERS.75.11.1307>
10. Li, J., & Wang, S. (2015). A method for estimating surface water area variations in arid regions using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing*, 7(9), 12133–12154. <https://doi.org/10.3390/rs70912133>
11. Yang, X., Zhao, S., Qin, X., Zhao, N., & Liang, L. (2017). Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening. *Remote Sensing*, 9(6), 596. <https://doi.org/10.3390/rs9060596>
12. Huggel, C., Kääb, A., Haeberli, W., Teyssie, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316–330. <https://doi.org/10.1139/t01-099>
13. Tulbure, M. G., Broich, M., Stehman, S. V., & Kommareddy, A. (2016). Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat

time series at subcontinental scale in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, 178, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.006>

14. Jin, H., Yang, X., & Xu, X. (2015). Remote sensing detection of water extent changes using Landsat data in the Nenjiang River Basin, Northeast China. *Remote Sensing*, 7(6), 6645–6667. <https://doi.org/10.3390/rs70606645>

15. Li, J., & Roy, D. P. (2017). A global analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 data revisit intervals and implications for terrestrial monitoring. *Remote Sensing*, 9(9), 902. <https://doi.org/10.3390/rs9090902>

РОЗДІЛ 3. АВТОМАТИЧНЕ ОЦИФРУВАННЯ ГІДРОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З ДОПОМОГОЮ QGIS 3.34

3.1. Аналіз програмного інструментарію для побудови цифрової моделі рельєфу.

Ви можете завантажити QGIS версії 3.34, безпосередньо з офіційного сайту QGIS (<https://static.qgis.org/en/site/forusers/download.html>). Ця версія містить багато нових функцій і покращень для аналізу та візуалізації просторових даних, що робить її ідеальним вибором для завдань, таких як побудова цифрових моделей рельєфу (ЦМР) або роботи з ГІС-даними, пов'язаними з річковими басейнами, такими, наприклад як річка Прут.

QGIS версії 3.34 – це потужне і безкоштовне програмне забезпечення для роботи з геоінформаційними системами (ГІС), яке забезпечує широкий спектр інструментів для аналізу просторових даних, картографування та моделювання. Стабільна версія 3.34 включає покращену функціональність, стабільність та оновлені інструменти для обробки векторних і растрових даних, зокрема моделювання цифрових моделей рельєфу.

Ми користуємось QGIS 3.34 для побудови ЦМР ОДд (цифрової моделі рельєфу області дослідження) річки Прут з кількох причин:

1. Підтримка різноманітних форматів даних. QGIS 3.34 підтримує роботу з багатьма типами геопросторових даних, що дозволяє легко інтегрувати дані рельєфу, гідрологічні дані та інші тематичні шари.

2. Широкий вибір інструментів ГІС. Програма має потужні інструменти для аналізу рельєфу, включаючи побудову та візуалізацію ЦМР, а також аналіз водозборів та потоків води.

3. Гнучкість і налаштування. QGIS дозволяє адаптувати робоче середовище під конкретні завдання, що робить його ідеальним для моделювання природних об'єктів, таких як річки і басейни.

4. Безкоштовність та відкритий код. QGIS 3.34 є безкоштовним, що робить його доступним для дослідників та фахівців з обмеженими бюджетами, забезпечуючи водночас високий рівень функціональності.

Ці особливості роблять QGIS 3.34 оптимальним вибором для побудови і аналізу цифрових моделей рельєфу річки Прут.

Поряд із QGIS ми будемо використовувати EO Browser, оскільки даний інструментарій надає актуальні та високодеталізовані дані дистанційного зондування Землі, що є ключовими для побудови цифрової моделі рельєфу області дослідження річки Прут.

Використання космічних знімків забезпечує актуальні дані про поверхню Землі, дозволяючи враховувати останні зміни рельєфу та земного покриву. Сучасні супутники надають зображення з високою роздільною здатністю, що дає можливість детально аналізувати особливості рельєфу та гідрографії. Багатоспектральні дані космічних знімків допомагають ідентифікувати різні типи поверхонь та об'єктів, що є важливим при моделюванні рельєфу.

EO Browser дозволяє легко отримувати та завантажувати космічні знімки, які можна інтегрувати в QGIS для подальшого аналізу та обробки. Поєднання даних дистанційного зондування з інструментами ГІС забезпечує більш точне та детальне відображення рельєфу, що є критичним для аналізу гідрологічних процесів та управління водними ресурсами.

Використання EO Browser та космічних знімків у поєднанні з QGIS надає комплексний набір інструментів для ефективного аналізу та моделювання рельєфу області дослідження річки Прут. Це підвищує якість та достовірність отриманих результатів, що важливо для наукових досліджень та практичних застосувань у сфері географії та екології.

Спектральні індекси – це показники, що характеризують співвідношення відбиття електромагнітного випромінювання (ЕМВ) в різних каналах супутникової зйомки. Спектральні індекси можуть підкреслювати певні особливості об'єктів, поліпшуючи як візуальне дешифрування, так і автоматизовані методи класифікації. Вони використовуються для різних досліджень, включаючи аналіз рослинності, водойм, ґрунтів та снігу. У нашому випадку ми будемо застосовувати спектральні індекси для дослідження водних об'єктів, зокрема для виявлення водних масивів.

3.2. Отримання даних дистанційного зондування землі з допомогою використання платформи EO Browser

Для отримання даних використовуватимемо платформу EO Browser, яка дозволяє завантажувати знімки з різних супутників, зокрема Sentinel-2.

Наша робота буде базуватись на завантажених космознімках із середньою роздільною здатністю 10 метрів. Для аналізу застосовуватимемо індекс NDWI, який є одним із найбільш поширених для виявлення водних об'єктів.

Для скачування космічного знімка території від села Бояни до села Маршинці через EO Browser нам спочатку потрібно відкрити веб-сайт за адресою <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. На головній сторінці ви бачимо карту світу з полем пошуку у верхньому правому куті, позначеним як «Search location» (Пошук місця). Введіть у це поле «Новоселиця» (як найбільший населений пункт на цій ділянці) і натискаємо Enter; карта автоматично перенесе вас до цього населеного пункту.

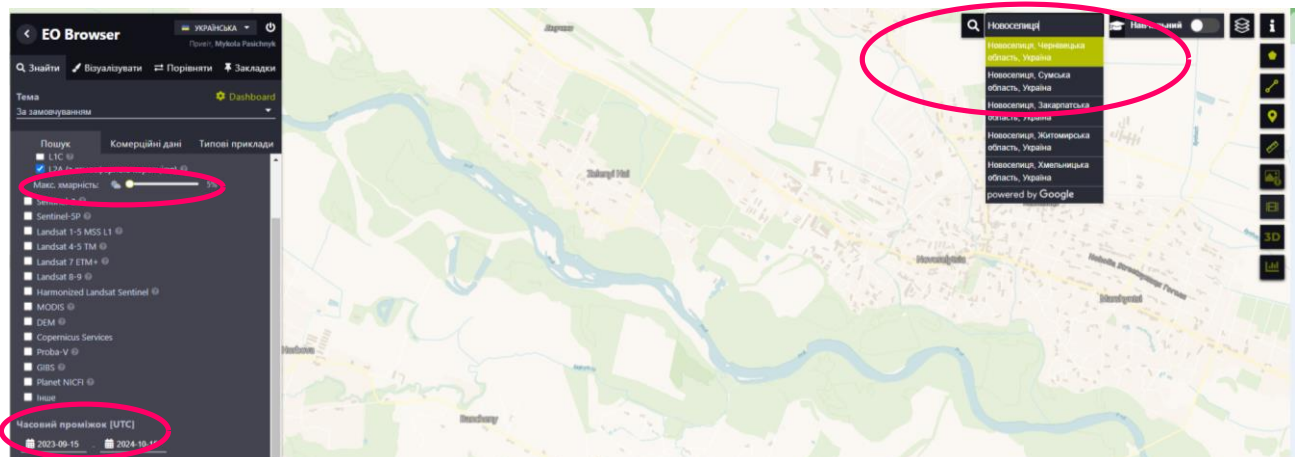


Рис.3.2.1 Процес налаштування вибору об'єкту дослідження, атмосферної кореляції та періоду дослідження

Після цього збільшуємо масштаб карти та перемістимо її таким чином, щоб охопити область від села Бояни до села Маршинці. На лівій бічній панелі переконаємось щоб у відкритій вкладці «Джерела даних» обираємо набір даних "Sentinel-2 L2A", який надає високоякісні оптичні знімки. Для якісного і повноцінного відображення поверхні Землі обираємо хмарність 5%. Далі переходимо до вкладки «Візуалізувати».

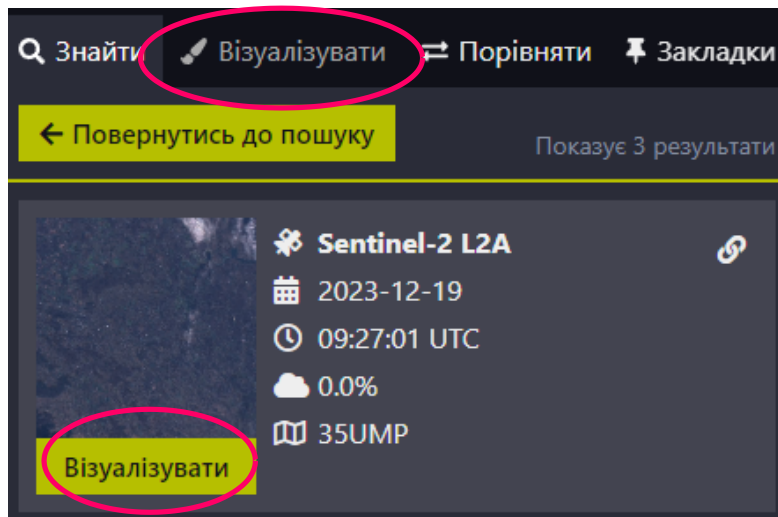


Рис.3.2.2. Вибір та візуалізація космознімку місії Sentinel -2 L2A

У нижньому лівому куті натисніть на кнопку «Time range» (Часовий проміжок), щоб вибрати дату зйомки. Встановіть проміжок від 1 листопада 2023 року до 1 січня 2024 року. Даний період нами обраний тому що в холодну пору року мало зелені і русло достатньо наповнене. Після цього натискаємо «Пошук», і система знайде доступні знімки за вказаними параметрами. Ознайомившись зі списком доступних знімків у нижній лівій частині панелі та нами для побудови ЦМР нами обрано космознімок за 19 грудня 2023 року.



Рис.3.2.3. Візуалізований об'єкт дослідження на космознімку за 19 грудня 2023 року в режимі “True color”

Для вибору параметрів завантаження необхідно вибрати іконку в меню справа  Перед завантаженням зображення космознімку переконайтесь, що він охоплює потрібну вам територію.

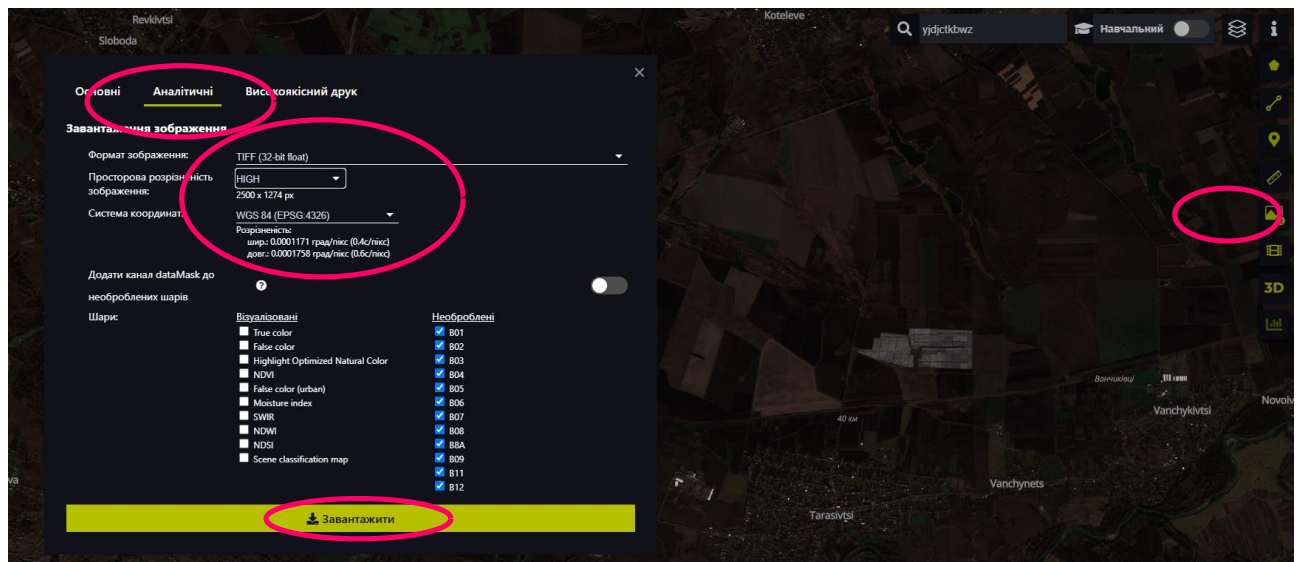


Рис.3.2.4. Процедура завантаження космознімків з платформи EO Browser

Натиснувши іконку завантаження відкривається вікно яке дозволяє обрати параметри космознімка що буде завантажуватись. У вікні завантаження необхідно вибрати закладку «Аналітичні». Далі обираємо формат завантаження - «TIFF (32 bit float)», що забезпечить географічну прив'язку файлу який буде завантажений пізніше. У розділі «Просторова роздільність зображення» необхідно обрати «High» (10 м на піксель) для максимальної деталізації завантаженого космознімка. Потім натискаємо на кнопку «Завантажити» (Download) внизу даної закладки. Окрім всього зазначеного раніше нам необхідно обрати додаткові канали. З «візуалізованих» шарів обираємо «NDWI» (для наступного порівняння), а серед «необроблених»- B01 - B12. (Див. рис.3.2.4)

Після налаштування параметрів натисніть кнопку «Завантаження» і чекаємо, поки зображення згенерується і буде запропоновано вибрати місце збереження архіву всіх шарів і «візуалізованих» і «необроблених». Перевіряємо папку із завантаженими знімками у папці, щоб переконатися, що вони відповідають нашим вимогам. Таким чином, отримуємо знімки ДЗЗ потрібної території, які можна використовувати для подальшого аналізу в QGIS або іншому ГІС-програмному забезпеченні.

3.3. Автоматичне оцифрування та ідентифікація ділянки річки Прут з допомогою індексів ідентифікації водних об'єктів в QGIS 3.34.

Після запуску QGIS і завантаження початкового вікна програми було створено новий проєкт з назвою "Pрут 19.12.2023". Хочемо зауважити, що використання латиниці для назв проєктів і об'єктів у QGIS має низку переваг. Використання кирилиці в назвах іноді може спричиняти проблеми з сумісністю в програмному середовищі QGIS або під час роботи з зовнішніми базами даних і системами. Тому латинські назви допомагають уникнути потенційних технічних труднощів.

При першому запусці QGIS дана панель може не запускатись. Необхідно переконатися, що відкриті панелі «Браузер», «Шари» та «Менеджер просторових закладок». Якщо ці панелі не активовані, потрібно перейти у верхнє меню «Вид» → «Панелі» і відмітити «Браузер», «Шари» та «Менеджер просторових закладок» (Рис. 3.3.1.).

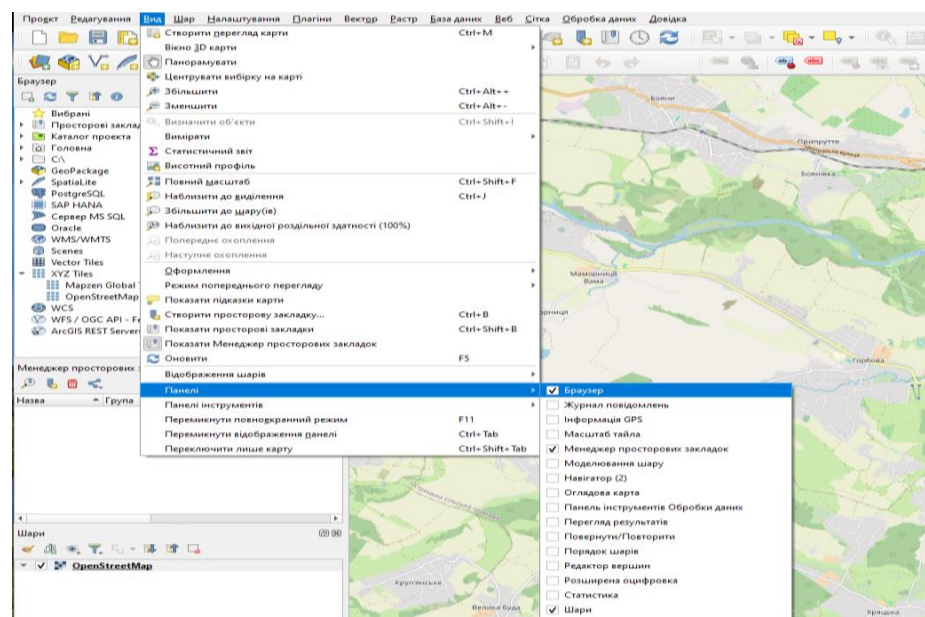


Рис.3.3.1 Перевірка наявності включених панелей «Браузер», «Шари» та «Менеджер просторових закладок».

До проєкту було додано карту OpenStreetMap. Для цього в панелі «Браузер» потрібно розкрити розділ XYZ Tiles та двічі клацнути мишею по шару OpenStreetMap, щоб він з'явився в таблиці шарів і відобразився у картографічному вікні (рис. 3.3.2.).

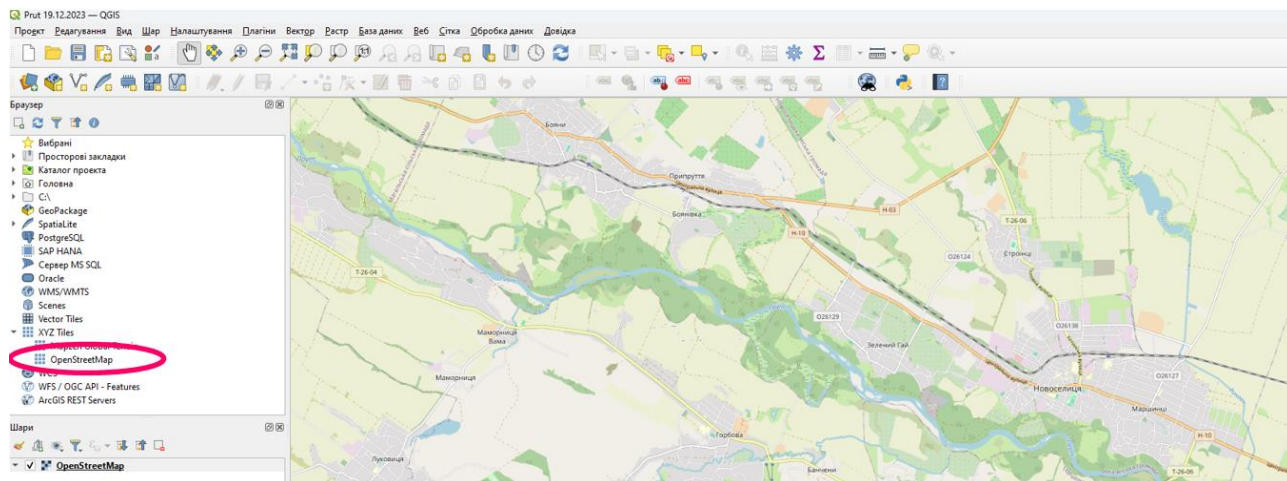


Рис. 3.3.2 Вигляд ділянки річки Прут між с. Бояни та с. Маршинці в OpenStreetMap в QGIS

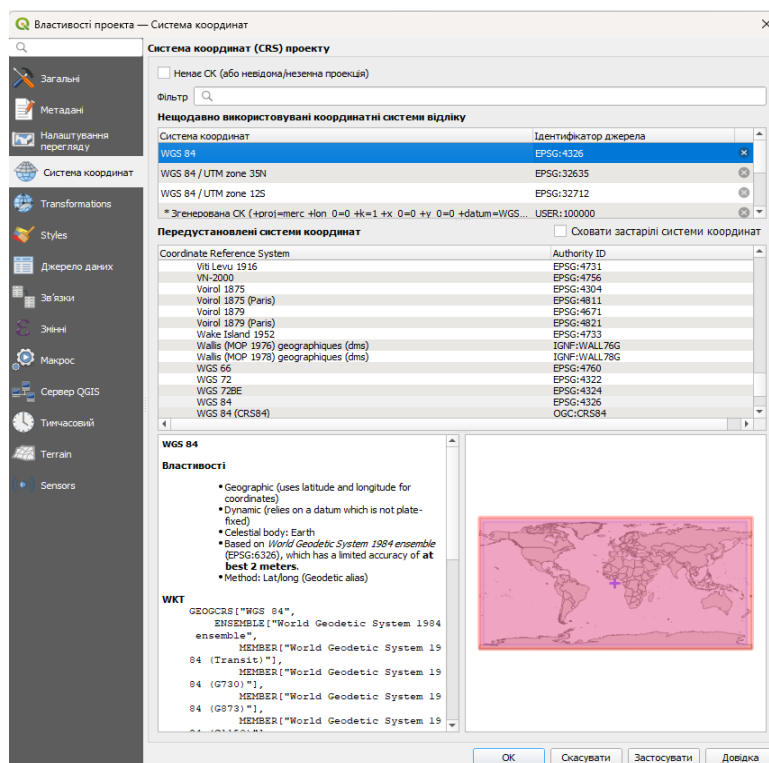


Рис. 3.3.3 Вибір системи координат для проекту

Хочемо зауважити, що весь наш проект, а також створювані шари були створені в системі координат WGS 84 (EPSG:4326)

Згідно із поставленим завданням в нашому дипломному дослідженні наступним нашим кроком буде ідентифікація русла річки Прут від сіл Бояни до села Маршинці. Для виставлення більш чітких меж об'єкту нашого дослідження ми скористались базою даних кафедри географії України та регіоналістики та було отримано шейпфайл який ідентифікує межі однорідної

ділянки днища річки(ОДд) та однорідної ділянки русла та заплави (ОДРЗ) річки Прут на даній ділянці (рис. 3.3.4).

Дана процедура, привнесення векторних меж дослідження, надає нам можливість чітко на карті ідентифікувати ділянку для визначення водного тіла річки Прут на космознімках.

Перед процедурою ідентифікації водних об'єктів необхідно провести об'єднання шарів які будуть задіяні в розрахунку. Наприклад для того щоб розрахувати індекс NDWI, згідно формули (див. пункт 2.1), нам необхідно використовувати спектральні знімки бендів В3 та В8 (зелений (GREEN) та ближній інфрачервоний бенд (NIR)).

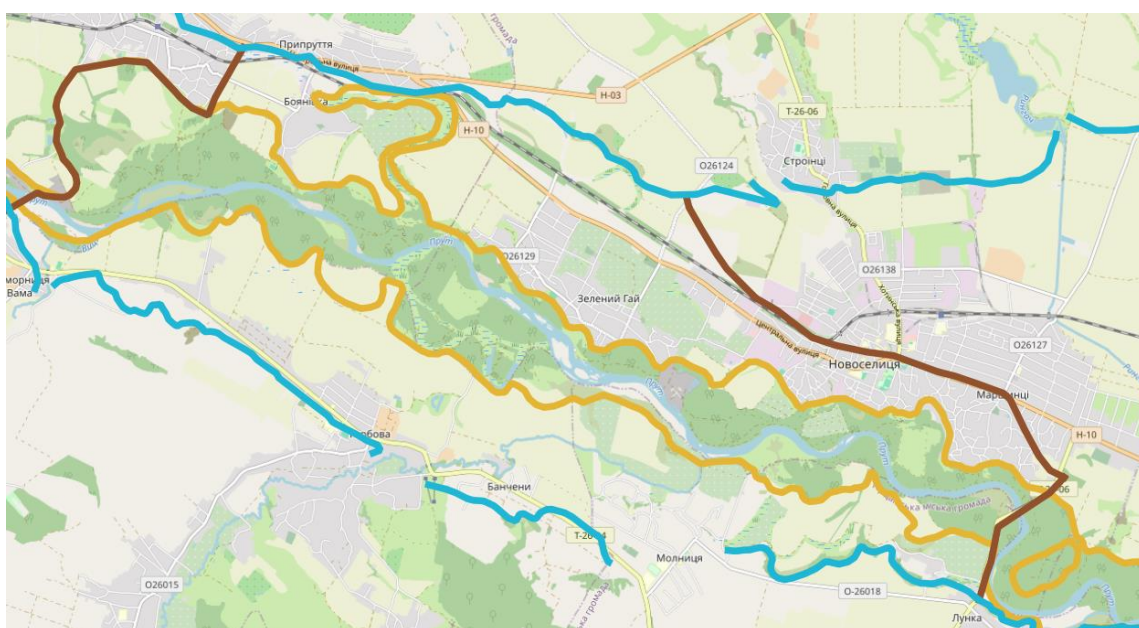


Рис. 3.3.4 Додавання до проекту меж ОДд та ОДРЗ як меж дослідження р. Прут

Далі всі бенди імпортуються у створений проект в програму QGIS 3.34, де можна створити багатошаровий растровий знімок за допомогою згаданої функції «об'єднання». Шлях до цієї функції наступний «Растр» → «Різне» → «Об'єднати». Послідовність виконання дій візуалізовано на рис. 3.3.5. Це дозволяє об'єднати окремі шари в один набір для зручного використання. Після цього необхідно перевірити відповідність кожного бенду, до його спектрального діапазону та забезпечити коректне використання для подальших розрахунків. Варто зазначити, що послідовність об'єднання шарів повинна бути такою самою як у формулі бендів для розрахунку індексів (див. пункт 2.1.).

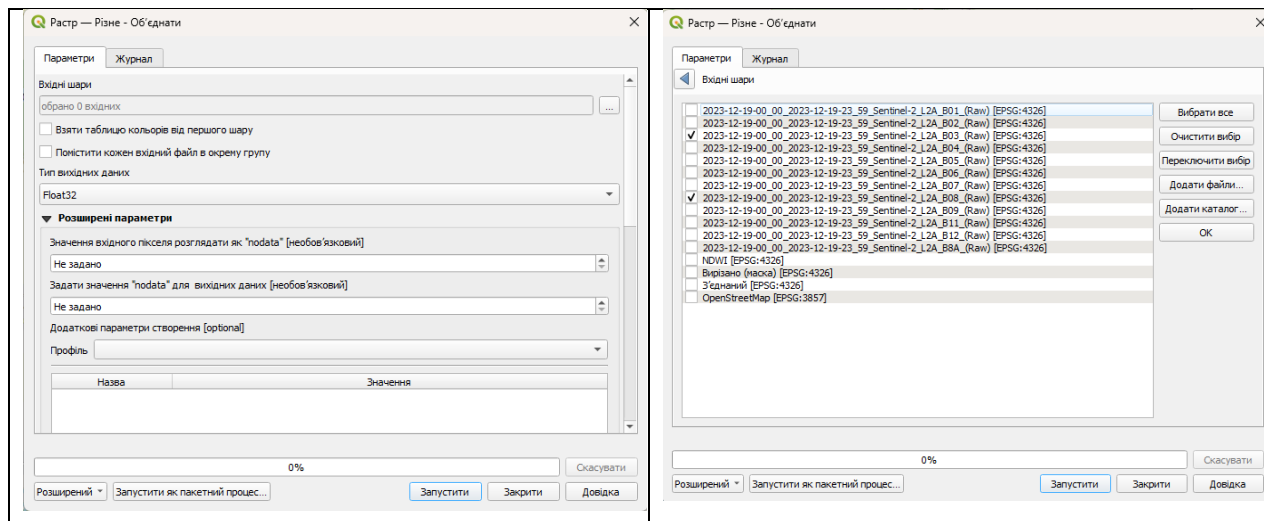


Рис. 3.3.5 Використання функції «Об'єднання» для підготовки космознімків до ідентифікації водних об'єктів.

Космознімки різних бендів можуть мати відмінності у розмірах пікселів, проекціях або територіальному охопленні (див. табл.3.1). Тому об'єднання знімків дозволяє вирівняти ці параметри, забезпечуючи узгодженість у просторовій розкладці та створюючи єдину основу для подальших розрахунків. Це також оптимізує обчислення, зменшуючи ймовірність помилок, які можуть виникати через неправильне поєднання шарів.

Синхронізація спектральних даних відіграє важливу роль, адже багато індексів і показників, таких як NDWI, MNDWI, AWEI чи WI2015, потребують одночасного використання кількох спектральних бендів. Для кожного із зазначених індексів необхідно провести об'єднання згідно формул і у відповідній послідовності (див. пункти 2.1-2.4.). Об'єднання гарантує доступність усіх необхідних даних для математичних розрахунків і забезпечує їхню коректну взаємодію. Нижче в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Відповідність бендів спектральним діапазонам супутників місії Sentinel 2

Бенд	Назва	Діапазон	Роздільна здатність
B1	Coastal Aerosol	443 нм	60 м
B2	Blue	490 нм	10 м
B3	Green	560 нм	10 м
B4	Red	665 нм	10 м
B5	Vegetation Red Edge	705 нм	20 м

B6	Vegetation Red Edge	740 nm	20 м
B7	Vegetation Red Edge	783 nm	20 м
B8	NIR (Near Infrared)	842 nm	10 м
B8A	Narrow NIR	865 nm	20 м
B9	Water Vapor	945 nm	60 м
B10	SWIR - Cirrus	1375 nm	60 м
B11	SWIR 1	1610 nm	20 м
B12	SWIR 2	2190 nm	20 м

Крім того, об'єднання шарів сприяє економії часу та спрощує робочий процес, особливо якщо потрібно проводити складні обчислення або моделювання з багатьма бєндами. Це дозволяє уникнути необхідності обробляти кожен шар окремо, що підвищує ефективність роботи. До того ж, воно забезпечує точність результатів, адже растровий калькулятор виконує розрахунки для кожного пікселя на основі значень у всіх бєндах. Без попереднього об'єднання можуть виникнути помилки, такі як зсуви чи некоректні значення.

Таким чином, об'єднання растрових знімків є необхідним підготовчим етапом, який гарантує якість і точність просторового аналізу, а також спрощує роботу з великими обсягами даних.

3.3.1. Ідентифікація водного тіла річки Прут з допомогою індекса Normalized Difference Water Index (NDWI)

Після підготовки даних використовується інструмент «Калькулятор растрів». У цьому інструменті вводиться математична формула для розрахунку потрібного індексу чи показника. Шлях до інструменту «Растр» → «Калькулятор растрів». В даний інструмент необхідно вводити формули для розрахунку того чи іншого індексу ідентифікації водної поверхні. Наприклад, для обчислення NDWI формула виглядає так: $(B3 - B8)/(B3 + B8)$. У формулі необхідно правильно використовувати назви шарів, створених на попередньому етапі.

Результат розрахунку нами було збережено у форматі GeoTIFF (але можна виконати також і в іншому зручному форматі), для чого заздалегідь вказується місце збереження файлу. Після завершення розрахунку отримуємо растровий шар що з'являється програмі для перевірки результатів. На цьому етапі можна проаналізувати шар, застосовуючи відповідні кольорові шкали для візуалізації значень.

За потреби результати можуть додатково оброблятися, наприклад, обрізатися за межами області інтересу або уточнюватися за допомогою інших інструментів. Завдяки цьому підходу стає можливим аналіз гідрологічних, екологічних чи інших параметрів досліджуваної території.

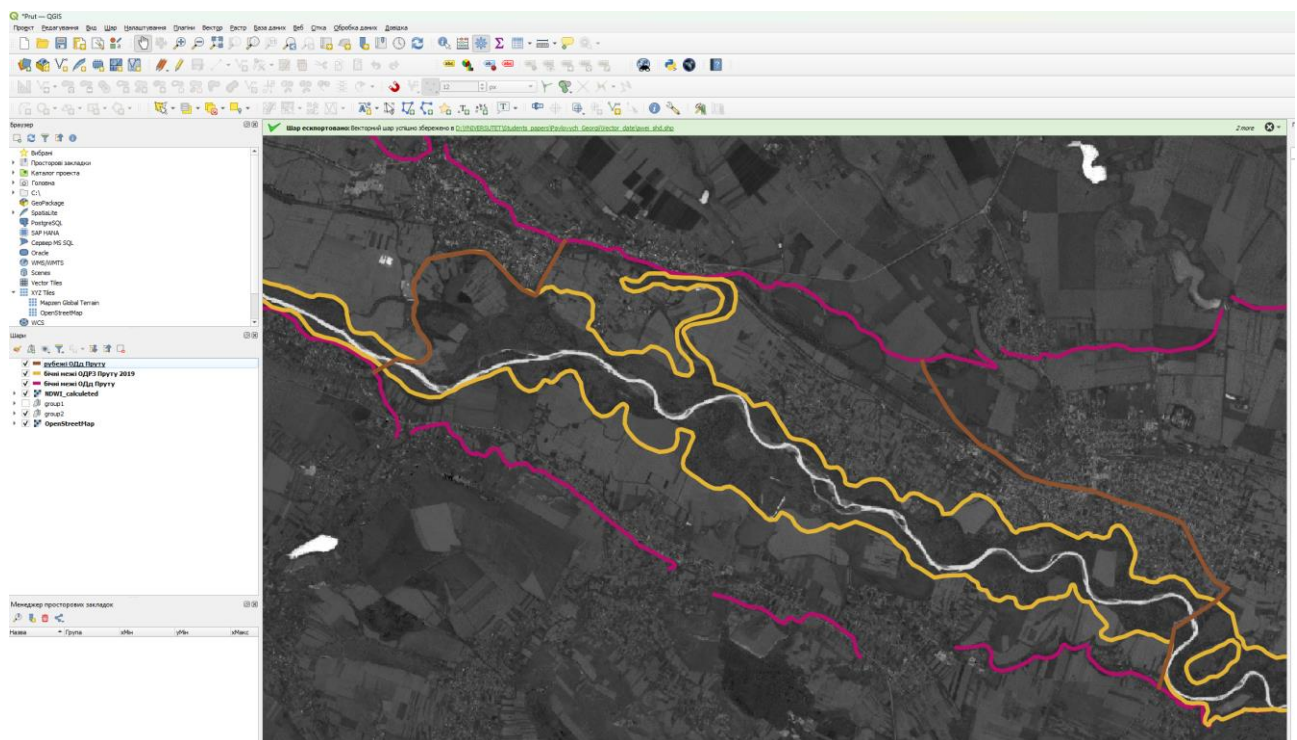


Рис. 3.3.6 Візуальне представлення розрахованого растрового шару індексу NDWI для досліджуваної ділянки річки Прут

Щоб ідентифікувати досліджувану ділянку річки прут в межах сіл Бояни - Маршинці на основі шару NDWI, нами було створено скетч-шар, яким грубо обводимо ділянку зазначену ділянку річки. У програмі QGIS для цього додається новий шар (як правило, це шар типу «Полігон»). Далі, за допомогою інструменту малювання полігонів, вручну обводиться контур обраного водного об'єкта на карті, спираючись на візуалізацію шару NDWI. Цей процес дозволяє точно окреслити межі ділянки, яка представляє водну поверхню.

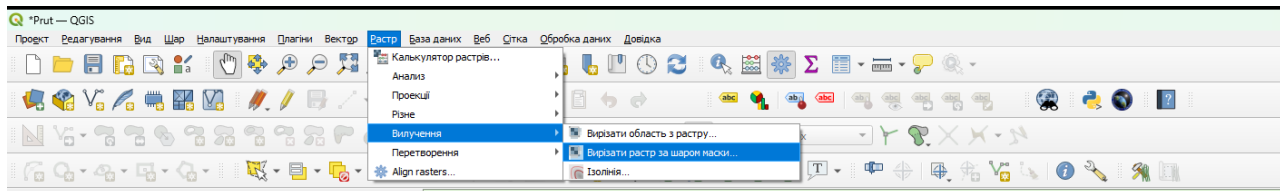


Рис. 3.3.7 Візуальне представлення вирізання з шару індексу NDWI частини обведеної скетч-шаром ділянки річки Прут

Після завершення обведення контурів водного об'єкта скетч-шар використовується як маска для вирізання необхідної ділянки з шару NDWI. Для цього в QGIS вибирається інструмент «Вирізати за шаром маски». Шлях до даного інструменту наступний: «Растр» → «Вилучення» → «Вирізати за шаром маски». У налаштуваннях цього інструменту вказується шар NDWI, як вхідний і скетч-шар, як шар для маски. Інструмент вирізає ту частину шару NDWI, яка потрапляє всередину обведеного полігону скетч-шару, і створює новий растровий шар, що містить лише виділену ділянку водного об'єкта (див. рис. 3.3.8).

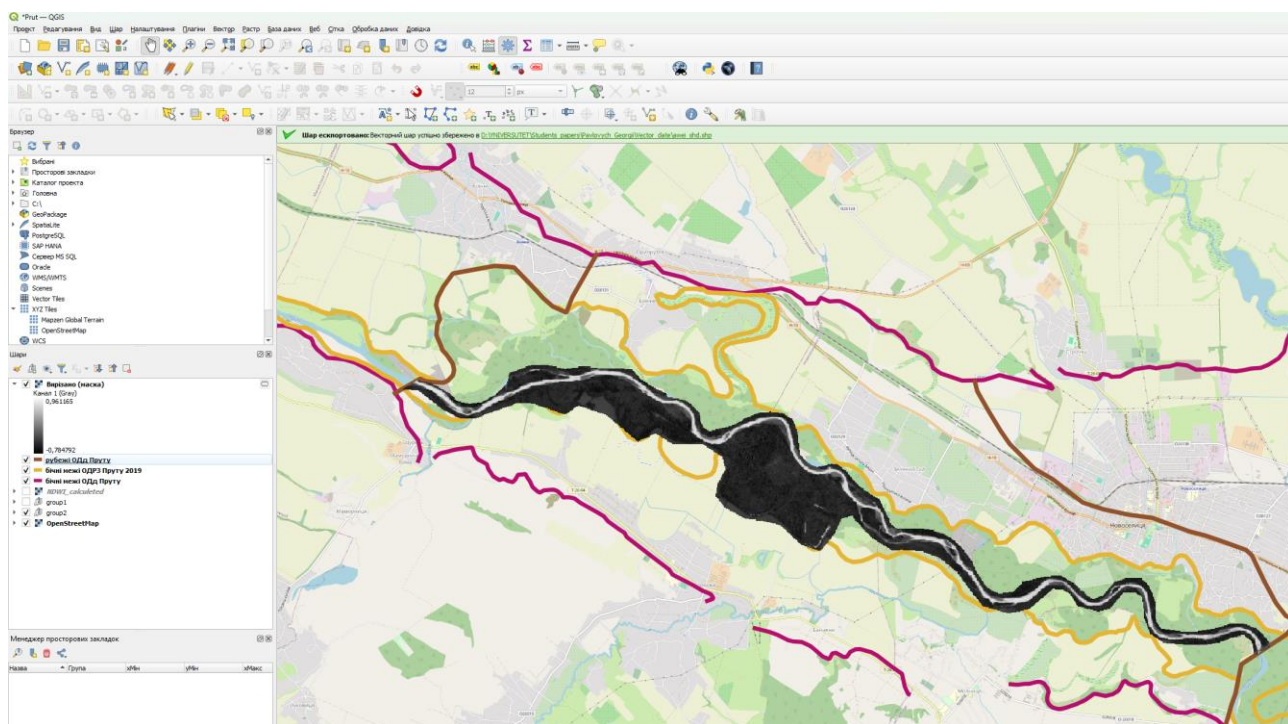


Рис. 3.3.8 Візуальне представлення вирізаного шару індексу NDWI досліджуваної ділянки річки Прут

Наступним нашим кроком є створення з вирізаного растрового шару векторного об'єкту. Щоб перетворити його у векторний формат потрібно скористатись інструментом «перетворення». Для цього в QGIS використовується переходимо за наступним шляхом через вкладку «Растр» →

«Перетворення»→ «Полігонізувати (растр у вектор)». У вікні що появиться у вас після виконання вище згаданого шляху необхідно буде обрати вхідний шар (зазвичай це вирізаний NDWI), і програма автоматично перетворює його в полігональний векторний шар. На виході формується новий векторний шар, де кожен полігон відповідає виділеній області водного об'єкта.

Після завершення цих кроків векторний шар можна редагувати, аналізувати або використовувати для подальших геоінформаційних операцій, таких як розрахунок площі водної поверхні, порівняння з іншими шарами або експорт у різні формати для звітів чи моделей. Така процедура дозволяє отримати точний і структурований результат, придатний для використання в дослідженнях і аналізах.

Після отримання векторного шару з вирізаного NDWI необхідно перейти до його аналізу та очищення. Спершу відкривають атрибутивну таблицю цього шару, що зазвичай містить стовпець із цифровими значеннями (DN), які відповідають значенням NDWI.

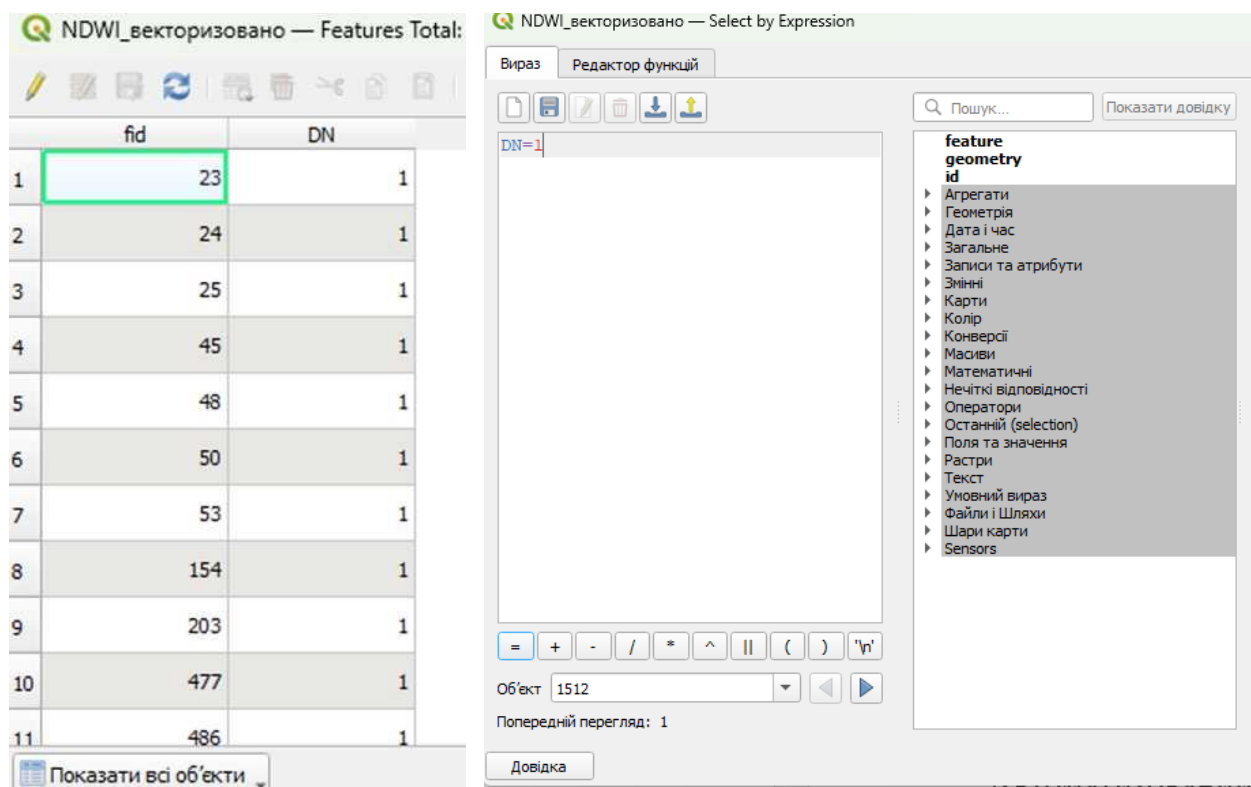


Рис. 3.3.9. Опрацювання атрибутивних даних векторизованого вирізаного шару NDWI для досліджуваної ділянки річки Прут.

Ці значення характеризують тип поверхні: позитивні значення свідчать про наявність води, тоді як негативні або нульові значення зазвичай вказують на

Як бачимо згідно рисунку 3.3.10 створене русло майже не має розривів та чітко повторює контури росла з рисунку 3.3.8. Русло річки виділено фіолетовим кольором, і його межі добре збігаються з береговою лінією на OpenToroMap. Це свідчить про ефективність використання NDWI для ідентифікації водних об'єктів.

Проте, як і у випадку більшості автоматизованих методів, можливі похибки. Наприклад, NDWI може виділяти не лише реальну водну поверхню, але й інші ділянки з подібними спектральними характеристиками, такі як заболочені території, затоплені зони або навіть тіні від об'єктів, що потрапили на супутникові знімки. Також дрібні чи окремі фрагменти води, які не є частиною основного русла, могли бути включені в результат. У нашому випадку протока в межах села Припруття слабо виражена (всього кілька векторизованих крапок.) Отже, на рисунку видно, що в руслі річки є точні сегменти, але в межах прилеглих територій можуть існувати полігони або ділянки, які не відповідають водній поверхні, але були автоматично виділені NDWI. Це вимагає додаткової ручної фільтрації або редагування, щоб видалити зайві елементи і залишити лише ті, які дійсно відповідають руслу річки.

3.3.2. Ідентифікація водного тіла річки Прут з допомогою індекса Modified NDWI (MNDWI)

Для розрахунку індексу Modified NDWI (MNDWI) використовується аналогічний підхід, що й для стандартного NDWI, але з певними уточненнями у формулі та подальшому аналізі. Modified NDWI краще ідентифікує водні об'єкти, особливо у міських або антропогенно трансформованих територіях, завдяки заміні інфрачервоного каналу (NIR) на середній інфрачервоний (SWIR), що дозволяє ефективніше відокремлювати воду від забудованих зон чи рослинності.

Більшість кроків ідентичні як і у попередньому підпункті 3.3.1., ми зупинимось на відмінностях. Після підготовки даних (наприклад, завантаження супутникових знімків та виконання їхньої попередньої обробки), відкривається

інструмент «Калькулятор растрів» у програмі QGIS. Для цього обирається меню «Растр» → «Калькулятор растрів». У цьому інструменті необхідно ввести математичну формулу для розрахунку MNDWI. Формула виглядає так:

$$\text{MNDWI} = (B3 - B11) / (B3 + B11)$$

де, B3 — це зелений канал (Green), а B11 — середній інфрачервоний канал (SWIR). Важливо правильно використовувати назви шарів, створених на попередньому етапі, оскільки помилки у виборі каналів можуть призвести до некоректного результату.

Після введення формули в калькуляторі растрів потрібно вказати місце збереження результату та бажаний формат, наприклад, GeoTIFF. Важливо вказати ім'я відмінне від інших в цій папці щоб унеможливити видалення подібних файлів. У нашому випадку ми назвали його MNDWI. Результати обчислень автоматично додаються до робочого простору програми у вигляді нового растрового шару.

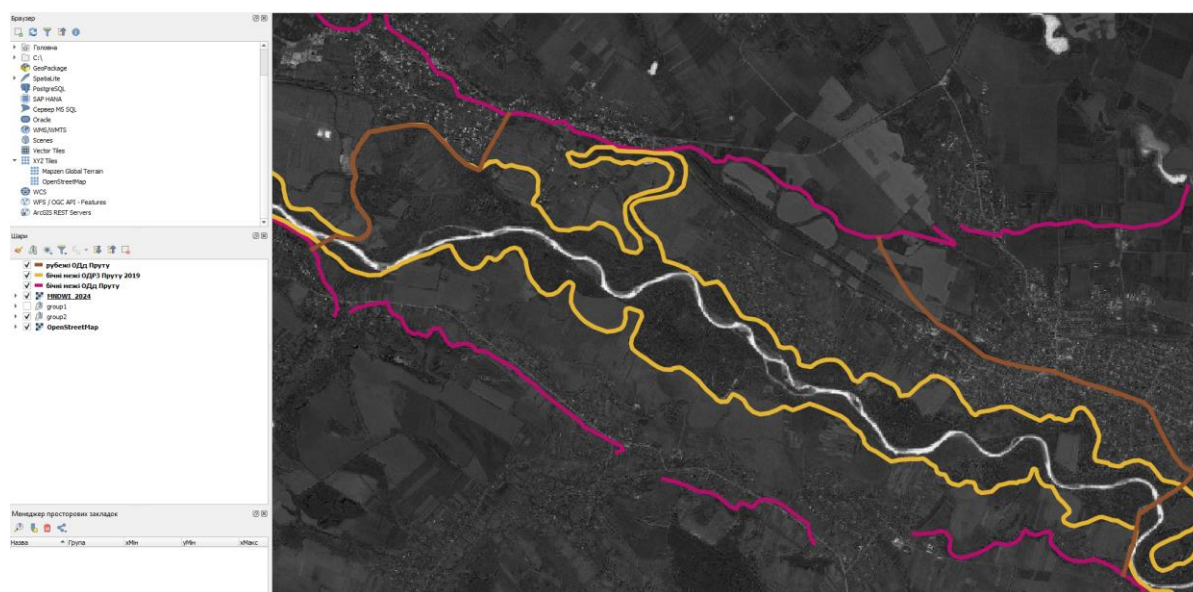


Рис. 3.3.11 Візуальне представлення розрахованого растрового шару індексу MNDWI для досліджуваної ділянки річки Прут

Modified NDWI часто забезпечує вищу точність у виділенні водної поверхні на антропогенно змінених територіях, де стандартний NDWI може виявитися менш ефективним через наявність міських споруд або заболочених територій. Завдяки MNDWI можна отримати чіткіші контури водних об'єктів, що особливо важливо для завдань моніторингу річок, озер чи інших водойм у міських або інтенсивно використовуваних сільськогосподарських регіонах.

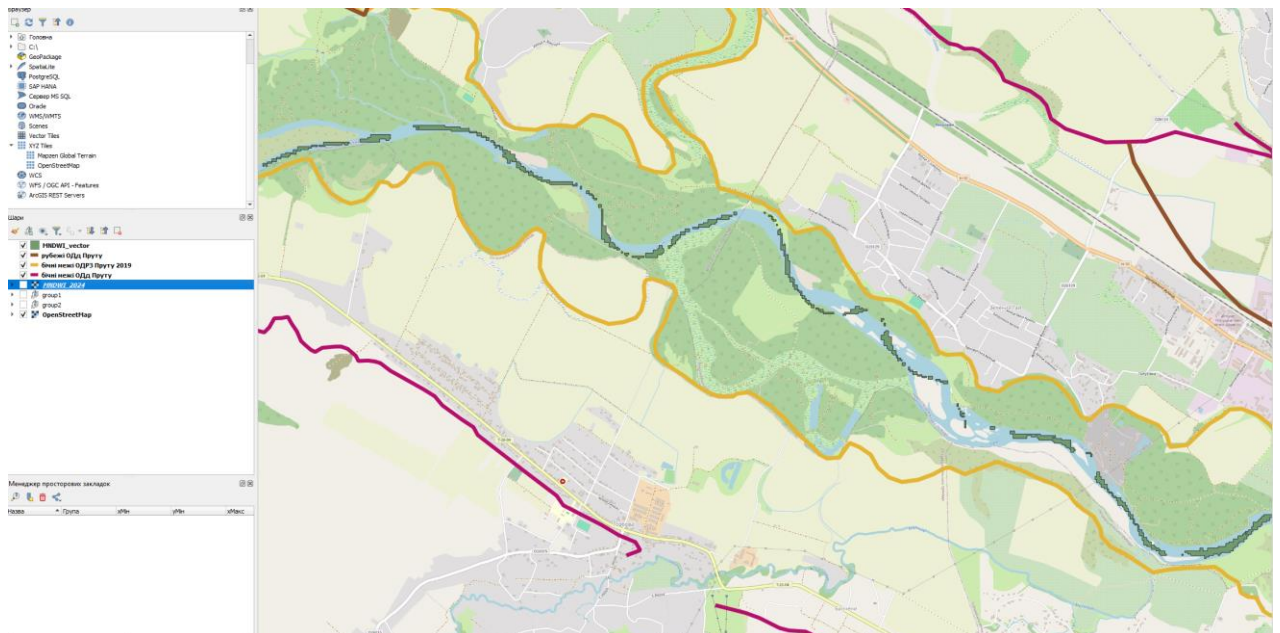


Рис. 3.3.12. Напівавтоматично векторизована поверхня водної поверхні річки Прут шляхом розрахунку MNDWI індексу.

Після отримання векторного шару з вирізаного MNDWI процедура аналізу та очищення проводиться аналогічно. Спершу відкривають атрибутивну таблицю цього шару, у якій міститься стовпець із цифровими значеннями (DN), що відповідають значенням MNDWI. Ці значення також характеризують тип поверхні, але в даному випадку індекс MNDWI дозволяє ефективніше відокремлювати водну поверхню від забудованих зон або інших сухопутних елементів. Позитивні значення, як правило, відповідають воді, тоді як нульові та негативні вказують на сухопутні чи неводні зони.

Для вибору релевантних полігонів використовується фільтрація об'єктів у таблиці атрибутів. У програмному забезпеченні QGIS для цього можна скористатися виразом на кшталт $DN > 0$, що дозволяє виділити лише полігони, які відповідають водній поверхні. Інші об'єкти, які мають значення $DN \leq 0$, необхідно видалити. Це можна зробити автоматично за допомогою інструментів видалення вибраних об'єктів або вручну, якщо кількість таких елементів

невелика.

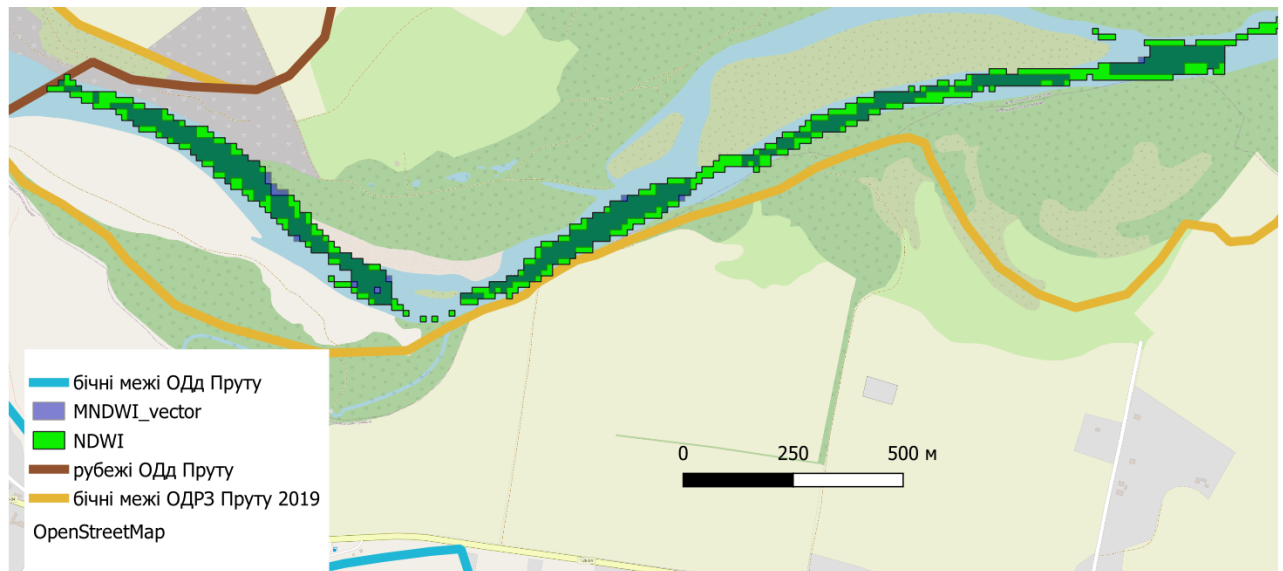


Рис. 3.3.13. Порівняння векторизованих шарів NDWI та MNDWI водної поверхні річки Прут.

Окрім цього, важливо звернути увагу на невеликі полігони, які можуть бути артефактами обробки, що виникли під час векторизації. Такі полігони слід видалити або об'єднати з більш великими, якщо вони є частиною русла річки. Цей процес дозволяє забезпечити точність даних, очищаючи їх від непотрібних елементів та створюючи більш надійний векторний шар.

Результатом має бути очищений векторний шар, який містить лише ті полігони, що відповідають водній поверхні річки Прут у межах досліджуваної території.

На завершальному етапі дані можуть бути інтегровані з іншими шарами або використані для створення тематичних карт. Очищений векторний шар дозволяє точно оцінювати зміни водної поверхні, проводити гідрологічні дослідження або розробляти адаптаційні стратегії управління водними ресурсами. Методика, заснована на використанні MNDWI, має переваги для аналізу складних територій, таких як міські або інтенсивно антропогенно змінені зони, і забезпечує можливість регулярного оновлення на основі нових супутникових даних.

Аналізуючи рисунок 3.13 можемо з впевненістю сказати, що індекс NDWI краще відображає водне дзеркало річки Прут в межах досліджуваної ділянки.

Оскільки MNDWI призначений для забудованих територій або територій з значним антропогенним впливом то він в певній мірі доповнює шар NDWI.

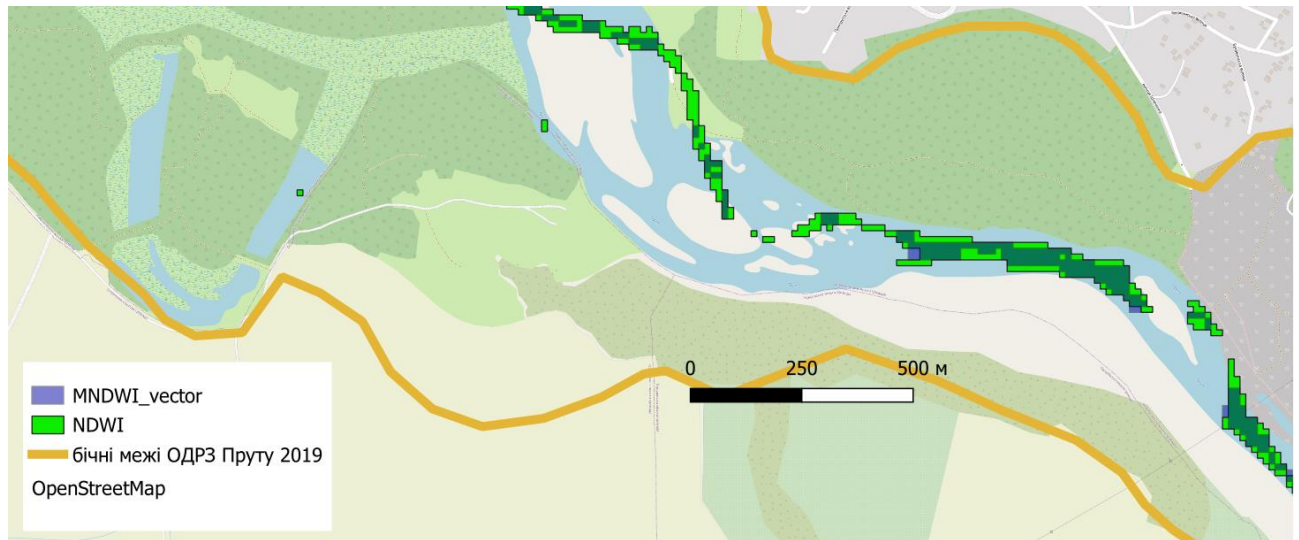


Рис. 3.3.14. Ідентифікація ділянок з відсутніми векторизованими шарами NDWI та MNDWI водної поверхні річки Прут.

Також можна чітко побачити, що ділянки де є скупчення островів з можливими перекатами, важко ідентифікуються як індексами NDWI так і MNDWI.

3.3.3. Ідентифікація водного тіла річки Прут з допомогою Автоматизованого індексу вилучення води (AWEI)

Як і в попередніх пунктах 3.3.1. та 3.3.2. нашого дослідження було проведено всі необхідні дії для визначення індексів AWEI_nsh та AWEI_sh

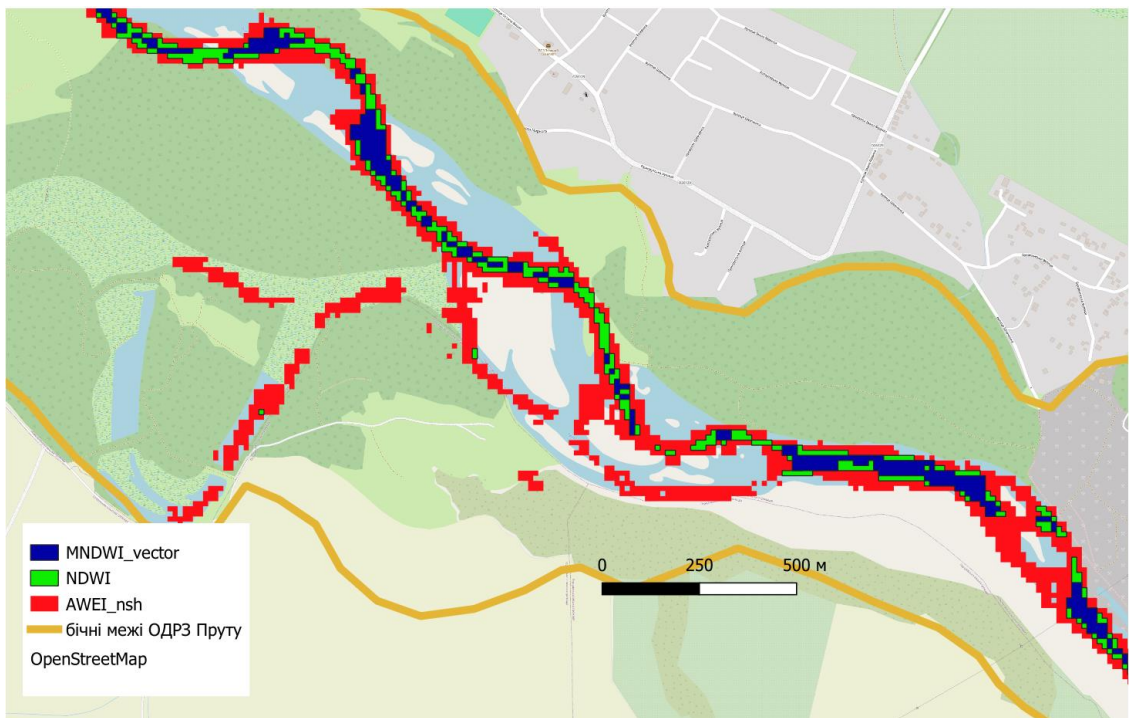


Рис. 3.3.15. Порівняння векторизованих шарів індексів NDWI, MNDWI та AWEI_nsh водної поверхні річки Прут.

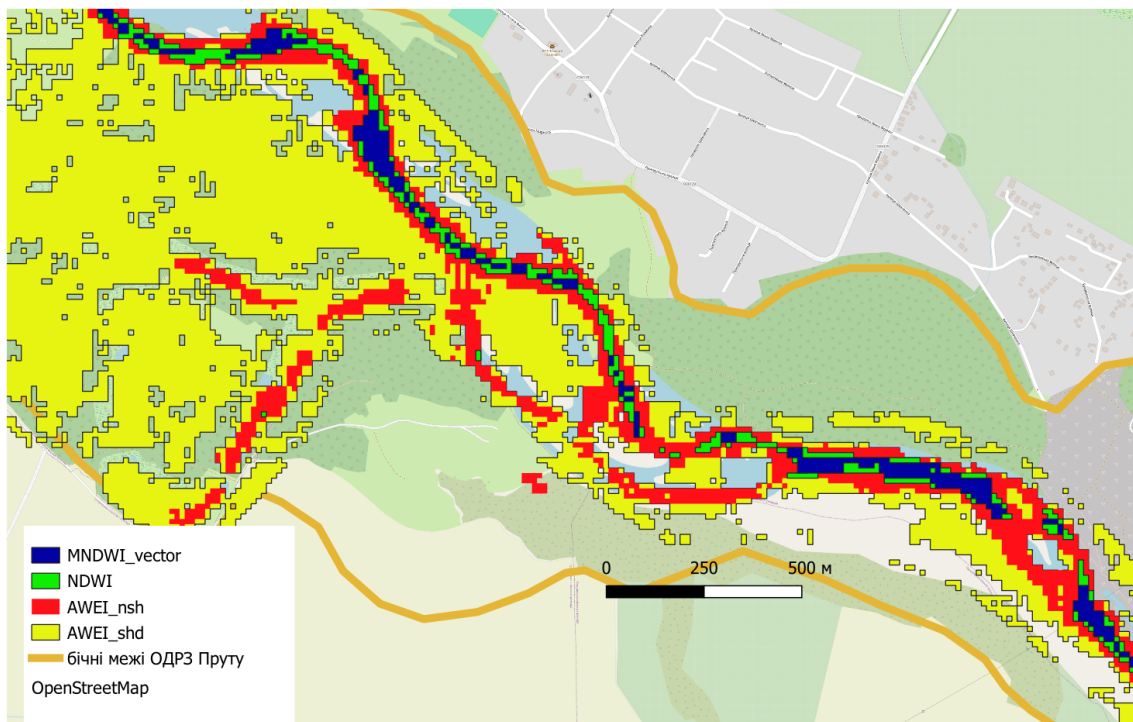


Рис. 3.3.16. Порівняння векторизованих шарів індексів NDWI, MNDWI, AWEI_nsh та AWEI_sh водної поверхні річки Прут.

Щодо використанні індексу AWEI_nsh варто вказати на те що він досить грубї але все ж таки ідентифікував дзеркало річки Прут.

Розглядаючи рисунки 3.3.15 та 3.3.16, можна зробити такі висновки щодо відмінностей у роботі індексів NDWI, MNDWI та AWEI на досліджуваній території.

1. Індекс AWEI_nsh зазвичай розроблений для автоматичного виділення водних об'єктів, особливо в складних умовах, таких як гірські регіони або забудовані території. У даному випадку, на річці Прут в межах сіл Бояни-Маршинці, AWEI, зокрема його варіант _shd, «заливає» майже всю територію, обведену скетч-шаром. Це може бути пов'язано з тим, що AWEI чутливий до поверхонь із високою вологістю, таких як вологий ґрунт, заболочені місця або навіть рослинність із підвищеним вмістом вологи. Оскільки досліджувана територія має широкі річкові долини і протікає через сільську місцевість, тут можливі значні площі з підвищеною вологістю, які AWEI ідентифікує як водні.

2. На відміну від AWEI, індекси NDWI та MNDWI чіткіше виділяють водне дзеркало річки Прут, що видно на рисунку 3.3.13, саме найширші його ділянки, в той час як протоки та невеликі заводи залишаються не ідентифікованими. Це пояснюється тим, що NDWI та MNDWI є більш чутливими саме до поверхонь, які безпосередньо відображають воду. NDWI працює з ближнім інфрачервоним (NIR) і зеленим каналами, тоді як MNDWI використовує середній інфрачервоний (SWIR), що дозволяє йому краще розрізняти воду в умовах наявності забудованих територій. Оскільки територія не є забудованою, NDWI та MNDWI демонструють схожі результати.

3. AWEI_shd заповнює майже всю територію, обведену скетч-шаром, тому що ця модифікація AWEI_shd спеціально розроблена для максимальної чутливості до вологи. Вона виявляє навіть найменші ознаки води чи вологи в зоні аналізу. Це призводить до включення прилеглих до річки територій, які можуть бути вологими через близькість до водного об'єкта або через природні особливості долини.

AWEI_nshd, натомість, створює більш суцільний шар, зосереджений виключно на дзеркалі води. Цей варіант індексу менш чутливий до вологих ґрунтів чи рослинності і краще підходить для територій, де потрібно чітко відокремити водну поверхню від інших типів земного покриття.

4. Особливість роботи AWEI_shd пов'язана з його алгоритмом, який розрахований на виділення води навіть у складних умовах, таких як тіні, вологі зони чи заболоченість. Однак, на територіях із широкими долинами та відсутністю значного антропогенного впливу цей індекс може надмірно «захоплювати» прилеглі до річки зони, що мають підвищену вологість. Таким чином, AWEI_shd корисний для дослідження потенційно затоплюваних територій або аналізу зон вологого ґрунту, але менш ефективний для точного визначення меж дзеркала води.

Таким чином, відмінності у результатах роботи індексів обумовлені їх специфікою та умовами використання. Для точної ідентифікації водної поверхні в даному випадку найбільш доцільно використовувати NDWI або MNDWI, а AWEI_shd - як додатковий інструмент для аналізу прилеглих зон із підвищеною вологістю.

3.3.4. Ідентифікація водного тіла річки Прут з допомогою Water Index 2015 (WI2015)

Water Index 2015 (WI2015) є спеціалізованим індексом для виявлення водних об'єктів, що враховує різні спектральні характеристики поверхонь, розробленим для мінімізації впливу навколишніх факторів, таких як рослинність, ґрунт або антропогенні елементи. На рисунках 3.3.17- Рис. 3.3.20, де застосовано WI2015 для ідентифікації водного тіла річки Прут, можна побачити його переваги та обмеження порівняно з іншими індексами, такими як NDWI, MNDWI чи AWEI.

WI2015 демонструє доволі чітке виділення дзеркала води, подібне до результатів NDWI і MNDWI. Це пов'язано з тим, що WI2015 адаптований для чіткого розрізнення водної поверхні за рахунок використання спектрального співвідношення, яке максимально враховує властивості води і мінімізує вплив рослинності та інших факторів. На досліджуваній території, де річка Прут протікає через сільську місцевість із широкими долинами, WI2015 забезпечує

виділення водної поверхні з високою точністю, при цьому не захоплюючи значних прилеглих зон, як це іноді трапляється з AWEI.



Рис. 3.3.17. Порівняння векторизованих шарів індексів NDWI та WI2015

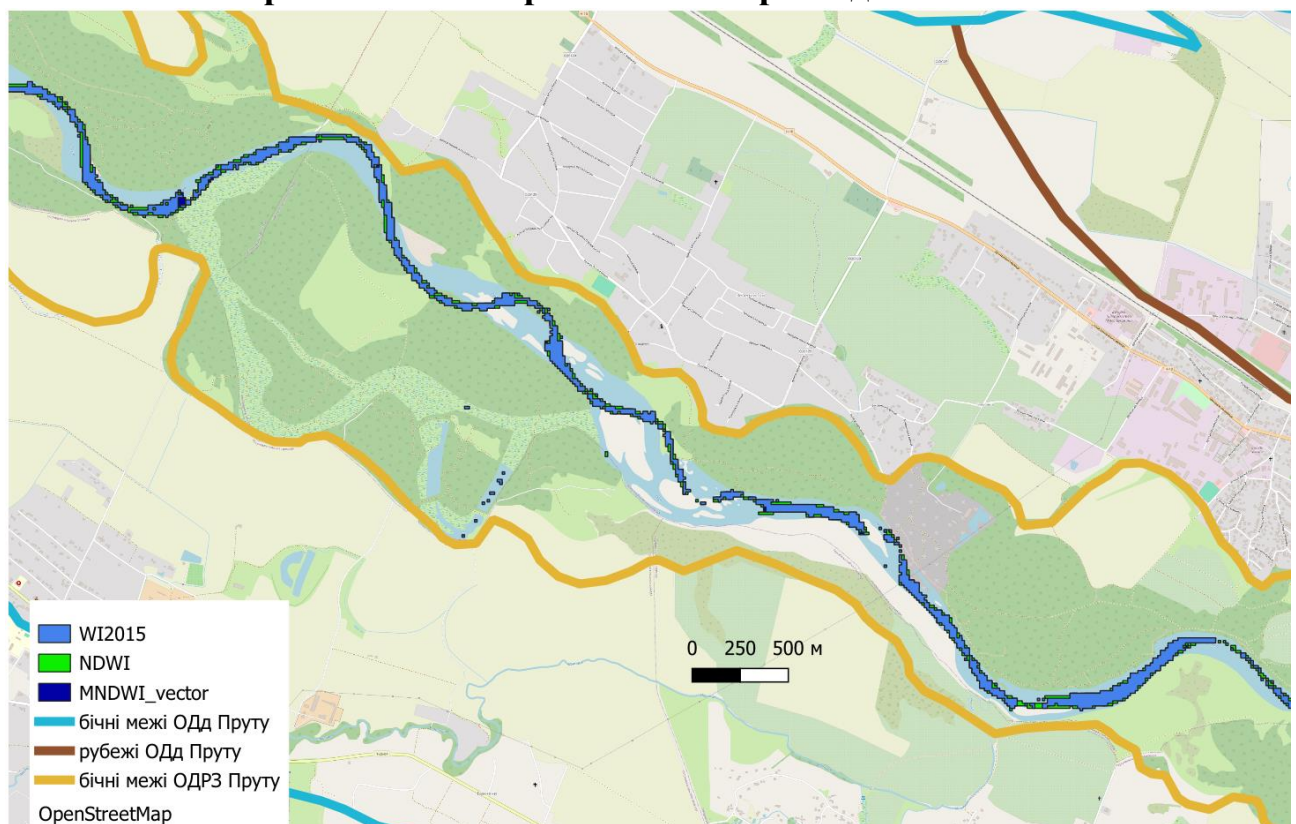


Рис. 3.3.18. Порівняння векторизованих шарів індексів MNDWI, NDWI та WI2015

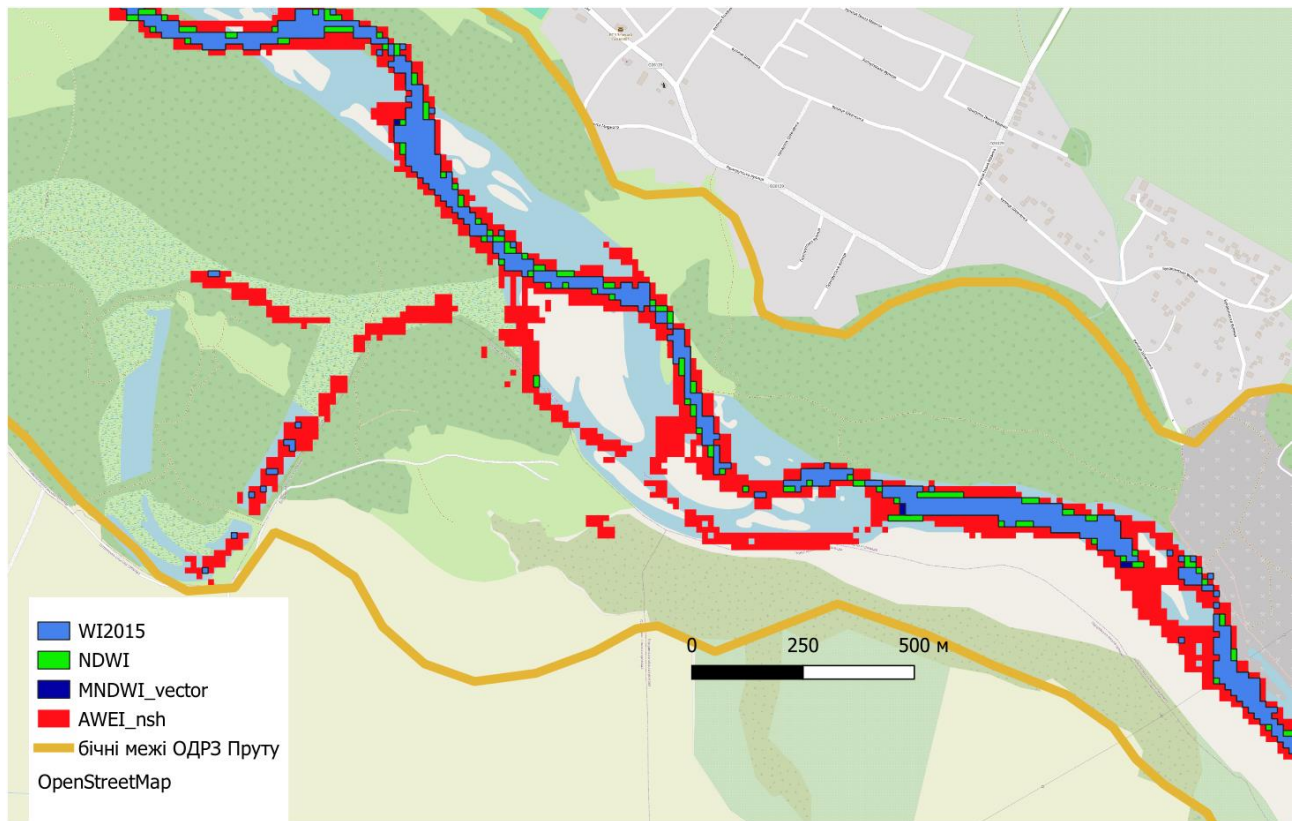


Рис. 3.3.19. Порівняння векторизованих шарів індексів MNDWI, NDWI, AWEI_nsh та WI2015

На відміну від AWEI, WI2015 не надто чутливий до вологого ґрунту чи заболочених територій, які оточують річку. Це дозволяє уникнути надмірного захоплення зон поза межами русла річки. Основною причиною цього є формула WI2015, яка використовує специфічні спектральні канали для ізоляції властивостей води та виключення впливу тіней, вологи або рослинності. Завдяки цьому WI2015 підходить для ідентифікації водної поверхні навіть у складних природних умовах.

WI2015 виділяється своєю здатністю не лише точно ідентифікувати водну поверхню, але й уникати помилок, спричинених рослинністю або сухими зонами. У порівнянні:

NDWI: Чітко ідентифікує водну поверхню, але в деяких випадках може включати прилеглі зони, що мають подібні спектральні характеристики.

MNDWI: Ефективніше виділяє водні об'єкти в урбанізованих чи забудованих територіях, але на сільських ділянках демонструє результати, схожі до WI2015.

AWEI_nshd: Надмірно чутливий до вологи, тому на цій території може «залити» великі прилеглі площі, які не є водною поверхнею.

WI2015 унікає надлишкового охоплення територій за межами русла завдяки своїй формулі та підходу до розрахунку індексу.

На досліджуваній території WI2015 забезпечує чітке визначення водного тіла річки Прут без надмірного захоплення навколишніх зон, що важливо для завдань, пов'язаних із визначенням площі водної поверхні, моніторингом змін русла річки та аналізом гідрологічних процесів. Цей індекс ефективно відокремлює водну поверхню від інших типів земного покриття, таких як сільськогосподарські угіддя чи трав'янисті зони, які зазвичай характерні для широких річкових долин.

Оскільки річка Прут протікає через сільську місцевість із мінімальним антропогенним навантаженням та широкими долинами, WI2015 дозволяє зосередитися саме на водній поверхні, не враховуючи прилеглі вологі зони чи заболочені території. Такий підхід робить WI2015 ідеальним вибором для аналізу природних річкових систем, особливо в умовах, коли важливо отримати точні дані про водну поверхню без включення додаткових елементів.

WI2015 можна успішно застосовувати для моніторингу змін водного тіла річки Прут, аналізу площі водної поверхні та створення тематичних карт. На основі отриманих результатів можна оцінювати водні ресурси або розробляти рекомендації для управління водними об'єктами. У поєднанні з іншими індексами, такими як NDWI чи MNDWI, AWEI_nshd дозволяє отримати більш комплексне уявлення про стан і динаміку водних ресурсів на досліджуваній території.

Висновок до розділу 3.

У ході дослідження було здійснено автоматичне оцифрування та ідентифікацію дзеркала водної поверхні річки Прут між селами Бояни та Маршинці за допомогою програмного забезпечення QGIS 3.34 та платформи EO Browser. Використання QGIS 3.34 забезпечило широкий спектр інструментів для аналізу просторових даних, картографування та моделювання, що зробило його оптимальним вибором для побудови цифрових моделей рельєфу та роботи з гідрологічними об'єктами. Платформа EO Browser надала доступ до актуальних та високоякісних космічних знімків місії Sentinel-2, які є ключовими для детального аналізу водних об'єктів.

Спектральні індекси були застосовані для ідентифікації водної поверхні річки Прут. Аналіз показав, що індекс NDWI найбільш точно відображає водне дзеркало на досліджуваній ділянці. MNDWI, хоча і призначений для урбанізованих територій, не продемонстрував значного покращення в умовах сільської місцевості та лише частково доповнив NDWI. Індекси AWEI_nsh та AWEI_sh виявилися надто чутливими до вологості ґрунту, що призвело до надмірного виділення прилеглих до річки зон і ускладнило точне визначення меж водної поверхні.

Індекс WI2015 показав високу ефективність у виділенні водної поверхні, подібно до NDWI, при цьому успішно уникаючи зон з підвищеною вологістю чи рослинністю. Це свідчить про його придатність для аналізу водних об'єктів у природних умовах без значного антропогенного впливу.

Отже, поєднання можливостей QGIS 3.34 та використання даних з EO Browser дозволило ефективно застосувати спектральні індекси для ідентифікації водної поверхні річки Прут. Найбільш придатними для точного визначення меж водного дзеркала виявилися індекси NDWI та WI2015. Використання цих індексів сприяє ефективному моніторингу гідрологічних об'єктів, аналізу їх динаміки та прийняттю обґрунтованих рішень у сфері управління водними ресурсами та екологічного планування.

Застосування QGIS 3.34 з його підтримкою різноманітних форматів даних та широким вибором інструментів, а також актуальних космічних знімків з EO

Browser, підвищує якість та достовірність отриманих результатів. Це важливо для наукових досліджень та практичних застосувань у сфері географії та екології, зокрема для управління річковими басейнами. Використання спектральних індексів у поєднанні з сучасними ГІС-технологіями дозволяє отримати детальну інформацію про водні об'єкти, що є критичним для аналізу гідрологічних процесів та прийняття екологічно обґрунтованих рішень.

Список використаних джерел

1. Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. R. (2014). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.029>
2. Xu, H. (2006). Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>

ВИСНОВКИ:

1. Аналіз сучасних методів напівавтоматичного цифрового картографування водних об'єктів показав, що поєднання дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем (ГІС) є не лише ефективним, але й необхідним підходом для ідентифікації та моніторингу водних тіл. Сучасні технології ДЗЗ надають можливість отримувати високороздільні супутникові знімки, такі як дані місії Sentinel-2, які забезпечують просторову роздільну здатність до 10 метрів. Це дозволяє детально картографувати водні об'єкти, включаючи малі річки та озера, і відстежувати їх зміни у часі. Використання платформ, таких як EO Browser, спрощує доступ до актуальних супутникових даних і забезпечує інтерактивний інтерфейс для попереднього аналізу зображень. Інтеграція цих даних у програмне забезпечення QGIS 3.34 надає потужні інструменти для обробки, аналізу та візуалізації, що сприяє оперативності та точності у прийнятті рішень щодо управління водними ресурсами. Таким чином, сучасні методи напівавтоматичного цифрового картографування забезпечують ефективний моніторинг водних об'єктів, що є критичним у контексті кліматичних змін та антропогенного впливу.

2. Дослідження та порівняння спектральних індексів NDWI, MNDWI, AWEI та WI2015 виявило, що кожен індекс має свої специфічні переваги та обмеження, які визначають його придатність у різних умовах. NDWI, базуючись на співвідношенні відбивної здатності в зеленому та ближньому інфрачервоному діапазонах, ефективно виділяє водні об'єкти, особливо в регіонах з мінімальним антропогенним впливом. MNDWI модифікує NDWI, замінюючи ближній інфрачервоний діапазон на короткохвильовий інфрачервоний, що підвищує точність в урбанізованих районах, зменшуючи вплив забудованих територій та рослинності. AWEI спрямований на мінімізацію впливу тіней та темних об'єктів, що є важливим у гірських районах або в умовах складного освітлення, але може бути надто чутливим до вологості ґрунтів, що призводить до хибнопозитивних результатів. WI2015 показав високу точність у виділенні водних об'єктів в умовах змішаного покриття та різної мутності води, використовуючи комбінацію червоного та зеленого

діапазонів. Вибір оптимального індексу залежить від специфіки досліджуваної території, мети аналізу та доступних даних.

3. Застосування програмного забезпечення QGIS 3.34 дозволило ефективно обробити супутникові знімки Sentinel-2 та розрахувати спектральні індекси для дослідження водної поверхні річки Прут. Виконано попередню обробку даних, включаючи завантаження знімків через платформу EO Browser, перепроекціювання до необхідної системи координат та, за потреби, атмосферну корекцію. За допомогою растрового калькулятора в QGIS розраховано індекси NDWI, MNDWI, AWEI_nsh, AWEI_sh та WI2015, використовуючи відповідні спектральні бенди. Інструменти класифікації дозволили виділити водну поверхню на основі порогових значень індексів, а функція векторизації перетворила результати векторні шари для подальшого аналізу. Використання QGIS 3.34 сприяло автоматизації процесу, підвищенню точності та ефективності обробки даних, що є важливим для регулярного моніторингу та управління водними ресурсами.

4. Автоматичне оцифрування та ідентифікація водної поверхні річки Прут між селами Бояни та Маршинці були успішно виконані завдяки застосуванню розрахованих спектральних індексів у QGIS 3.34. Використовуючи результати індексів, виділено водне дзеркало річки та створено відповідні векторні шари, що відображають контури водної поверхні. Це дозволило детально проаналізувати форму та площу водного об'єкта, а також виявити можливі зміни та особливості русла. Порівняння результатів, отриманих за допомогою різних індексів, надало можливість оцінити їх ефективність та придатність для конкретних умов дослідження. Виконана робота підтвердила, що застосування спектральних індексів у поєднанні з потужними інструментами ГІС дозволяє автоматизувати процес оцифрування, підвищити точність та зменшити часові витрати на аналіз.

5. Оцінка ефективності різних спектральних індексів показала, що NDWI та WI2015 найбільш точно відображають водну поверхню річки Прут у сільській місцевості з мінімальним антропогенним впливом. NDWI забезпечує чітке виділення водного дзеркала, мінімізуючи вплив рослинності та сухих

ґрунтів. WI2015, використовуючи комбінацію червоного та зеленого діапазонів, підвищує чутливість до водних об'єктів навіть при різній мутності води та наявності рослинності на поверхні. MNDWI не продемонстрував значних переваг у даних умовах, оскільки територія дослідження не характеризується високою урбанізацією. AWEI виявився надто чутливим до вологості прилеглих територій, що призводило до хибнопозитивних результатів та ускладнювало точне визначення меж водної поверхні. На основі проведеного аналізу рекомендовано використовувати NDWI та WI2015 для моніторингу водних об'єктів у сільській місцевості, оскільки вони забезпечують високу точність та надійність результатів. При виборі індексу слід враховувати специфіку території, мету дослідження та можливі обмеження кожного методу, що сприятиме більш ефективному управлінню водними ресурсами та екологічному моніторингу.