

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Географічний факультет
Кафедра географії України та регіоналістики

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ РУСЛА РІЧКИ СІРЕТ
(ЗА ПЕРІОД ВІД 1860-х ДО СЬОГОДЕННЯ)

Дипломна робота

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Здобувача 2 курсу, 617 групи

Спеціальності 103 Науки про Землю

ОП «Гідрологія»

Майстра Віталія Ярославовича

Керівник: доц.,к.геогр.н.Пасічник М.Д.

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № 22

від „25” 11 2024р.

зав. кафедри _проф. Косташук І.І.



Чернівці – 2024

АНОТАЦІЯ

Майстра Віталія Ярославовича

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНОВИХ ДЕФОРМАЦІЇ РУСЛА РІЧКИ СІРЕТ (ЗА ПЕРІОД ВІД 1860-х ДО СЬОГОДЕННЯ)

Анотація. У магістерській роботі розглядаються методи цифрової ідентифікації планових деформацій русла річки Сірет у транскордонному регіоні України та Румунії. Використовуючи космічні знімки місії Landsat 4-5 та 8-9, а також оцифровані історичні карти, було створено покрокову методику аналізу просторово-часових змін водних об'єктів. Основна увага приділялася геоприв'язці картографічних матеріалів, визначенню зон інтенсивних змін руслових структур, створенню багат шарових цифрових карт і векторних моделей. Розроблена методика є універсальною і може бути адаптована для інших річкових систем. Практичне значення роботи полягає у можливості її використання для оцінки планових змін русла річки, розробки рекомендацій з управління водними ресурсами та покращення екологічного стану басейнів річок.

Ключові слова: планові деформації русла, ARCGIS, QGIS, ОДРЗ, БСР.

ABSTRACT

MAISTER VITALII YAROSLAVOVYCH

*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*

RESEARCH OF PLANNED RIVERBED DEFORMATIONS ON THE SIRET RIVER (FROM THE 1860S TO THE PRESENT)

Abstract. The master's thesis explores methods for the digital identification of planform deformations of the Siret River channel in the cross-border region of Ukraine and Romania. Using satellite images from the Landsat 4-5 and 8-9 missions, as well as digitized historical maps, a step-by-step methodology for analyzing spatiotemporal changes in water bodies was developed. The main focus was on georeferencing cartographic materials, identifying areas of intensive channel structure changes, and creating multilayer digital maps and vector models. The developed methodology is universal and can be adapted for other river systems. The practical significance of the study lies in its applicability for assessing planform changes in river channels, developing recommendations for water resource management, and improving the ecological condition of river basins.

Keywords: planned riverbed deformations, ARCGIS, QGIS, river basin, long-term channel formation zone (LTChFZ), homogeneous area of the riverbed and floodplain (HARF).

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



(підпис) В.Я. Майстер

ЗМІСТ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ І. ПРИРОДНІ УМОВИ БАСЕЙНУ РІЧКИ СІРЕТ	9
1.1. Морфологія річки Сірет в межах України	9
1.2. Ландшафти	13
1.3. Клімат	15
1.4. Гідрологічні умови	19
1.5. Використання водних ресурсів басейну р.Сірет	20
РОЗДІЛ ІІ. ОГЛЯД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
2.1. Огляд EO Browser як засобу для дослідження поверхні планети та водних об'єктів на ній	26
2.2. Огляд можливостей QGIS 3.34 для аналізу водних об'єктів та визначення коефіцієнта звивистості	29
2.3. Огляд можливостей ArcGIS 10.4 для роботи з картами та дослідження водних об'єктів.	33
РОЗДІЛ ІІІ. ВІДПРАЦЮВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ДІЛЯНЦІ РІЧКИ СІРЕТ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ГІС ТЕХНОЛОГІЙ.	37
3.1. Опрацювання карт 1860-х- 1950-х років з допомогою ArcGIS та QGIS	37
3.2. Напрацювання методики використання космознімків місії Landsat за 1984-2024 роки з допомогою EO Browser.	41
3.3. Напрацювання методики використання космознімків місії Landsat за 1984-2024 роки з допомогою EO Browser.	46
3.4. Відпрацювання методики виділення багаторічної смуги руслоформування та рекомендації щодо її використання	58
ВИСНОВКИ	65
Список використаних джерел	68

Вступ

Водні ресурси Карпатського регіону мають ключове значення для екологічної рівноваги, економічного розвитку та соціального благополуччя. Річки цього регіону забезпечують питною водою місцеве населення та сільське господарство, є джерелом гідроенергетичних ресурсів та підтримання біорізноманіття. Однак останніми десятиліттями спостерігається зростання частоти та інтенсивності гідрологічних небезпечних явищ, зокрема повеней і паводків.

Карпатський регіон відомий своєю високою водністю та частими повенями. За даними Державної служби України з надзвичайних ситуацій, у період з 1990 по 2020 роки кількість повеней у регіоні зросла на 25%. Зокрема, повені 2008, 2010 та 2020 років призвели до значних матеріальних збитків, руйнування інфраструктури та негативних екологічних наслідків в тому числі і в басейні річки Сірет. Ці явища пов'язані як з глобальною зміною клімату, яка призводить до збільшення кількості екстремальних погодних явищ, так і з антропогенним втручанням в басейнові екосистеми.

Зміна клімату сприяє підвищенню частоти та інтенсивності опадів, що збільшує ризик паводків. За даними Українського гідрометеорологічного інституту, середня температура в Карпатах зросла на 1,2°C за останні 50 років, що впливає на режим танення снігів і, відповідно, на водність річок.

Антропогенний вплив на річки, особливо на малі та середні водотоки, значно зріс у період, що охоплюється дослідженням (1863–2024 роки). Масштабна вирубка лісів, яка спостерігалася протягом ХХ століття, призвела до зменшення лісового покриву Карпат на 15–20%. Ліси відіграють критичну роль у регулюванні стоку та запобіганні ерозії, тому їх знищення негативно вплинуло на гідрологічний режим річок.

Крім того, розорювання прибережних зон, будівництво дамб та інших гідротехнічних споруд (в тому числі і очисних споруд), без належного екологічного обґрунтування спричинило зміну руслових процесів (до активізації ерозійних процесів), так і погіршення якості.

Дослідження планових деформацій русла річки Сірет на ділянці від гирла Малого Сірету до кордону з Румунією є важливим для розуміння довгострокових тенденцій руслових процесів у контексті кліматичних змін та антропогенного впливу в транскордонному регіоні Україна-Євросоюз. Використання сучасних геоінформаційних технологій та автоматизованих методів аналізу дозволяє отримати точні та оперативні дані, що є необхідними для розробки ефективних заходів з управління водними ресурсами.

Таким чином, актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю вирішення важливих наукових та практичних завдань, пов'язаних зі зменшенням негативних наслідків повеней, збереженням екосистем та забезпеченням сталого розвитку регіону.

Мета дослідження: вивчення планових деформацій русла річки Сірет у межах транскордонного регіону України та Румунії за період від 1860-х років до сьогодення.

Об'єкт дослідження: планові деформації русла річки Сірет у межах від гирла річки Малого Сірету до державного кордону України та Румунії.

Предмет дослідження: полягає в автоматичній ідентифікації планових деформацій русла річки Сірет, на основі космічних знімків місії Landsat 4-5 та 8-9, а також оцифруванні історичних карт.

Завдання дипломного дослідження:

1. Описати фізико-географічні умови басейну річки Сірет та особливості використання водних ресурсів річки.
2. Описати процес збору та обробки вихідних даних для дослідження басейну річки Сірет, зокрема використання історичних карт і супутникових знімків, та пояснити їх значення для аналізу змін у басейні.
3. Розробити методику створення карт басейну річки Сірет, включаючи геоприв'язку історичних карт і супутникових знімків, застосування індексу NDWI для виділення водних об'єктів, та побудову векторних моделей і багаточарових карт.

4. Описати процес геоприв'язки історичних карт і супутникових знімків до системи координат WGS 84, підкресливши важливість використання контрольних точок для мінімізації похибок при трансформації зображень.

5. Використовуючи багатошарові цифрові моделі, проаналізувати основні просторово-часові зміни водних об'єктів і руслових структур у басейні річки Сірет, визначити зони найбільш інтенсивних змін та можливі причини цих змін.

РОЗДІЛ I

ПРИРОДНІ УМОВИ БАСЕЙНУ РІЧКИ СІРЕТ

1.1. Морфологія річки Сірет в межах України

Частина території Буковини, що розташована між річками Білий Черемош, Черемош, Сірет і Сучава, відзначається складною річковою мережею з різноманітними напрямками течії. У попередніх дослідженнях вже було акцентовано увагу на існуванні реліктової долини Пра-Черемошу під назвою «Багна», яка сьогодні представлена невеликою лівою притокою Сірету— річкою Ліхидра. Це явище пояснюється процесом давнього річкового перехоплення, викликаного значними різницями у висотах дна долин передкарпатського Пра-Черемошу-Сірету та Пруту. Такі особливості свідчать про складну тектонічну будову території, яку додатково ускладнює наявність блоків і структур різних масштабів. У результаті долина річки Сірет в межах України та місцеві умови формування її русла й заплави мають унікальні характеристики, які швидко змінюються вздовж течії.

У працях Ющенко Ю.С., Кирилюка А.О., та Паланичко О.В. зазначалося, що для річок гірських і передкарпатських регіонів характерна закономірність поступових змін руслоформування вздовж течії. Для річок Передкарпаття це проявляється у переході від розгалужених до звивистих і мандрівних русел у міру віддалення від гір. Проте на конкретних річках ці зміни залежать від локальних умов, таких як особливості ділянок річкових долин, їхнє порівняно рівне дно (сучасні алювіальні рівнини) та розташування смуги руслоформування в межах цих долин.

Уже від місця злиття витоків Дастун і Барсуки дно долини суттєво розширюється. Біля села Лопушна цей характер стає постійним, і власне тут починається алювіальна рівнина, яка, що цікаво, формується у гірській частині (від початку річки). Цю особливість зафіксовано на карті Братеску, де відображено напрям течії на північ, у субмеридіональному напрямку. Майже прямолінійна ділянка долини простягається до гирла притоки Сухий, розташованого у верхній частині смт Берегомет. Така пряма форма долини

відрізняється від більшості річок Передкарпаття, що ще раз підкреслює унікальність Сірету.

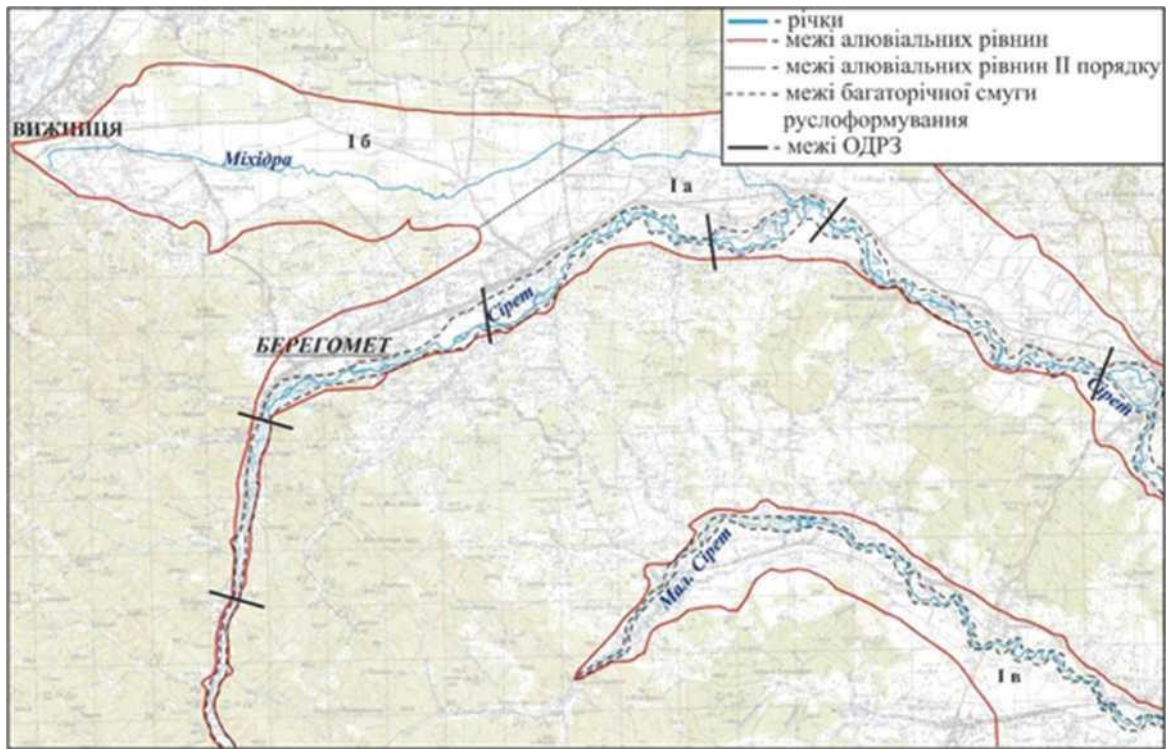


Рис. 1.1 представлено фрагмент геоморфологічної карти Братеску [15]

Далі за течією річка Сірет залишає гірський регіон і переходить у передгірську зону. На цьому відрізку її течія набуває східно-північно-східного напрямку. Долина поступово розширюється, утворюючи широку субширотну алювіальну рівнину прадавньої долини Пра-Черемошу. У цьому регіоні смуга руслоформування помітно зміщується до правого борту долини, що можна побачити на рис. 1.2.

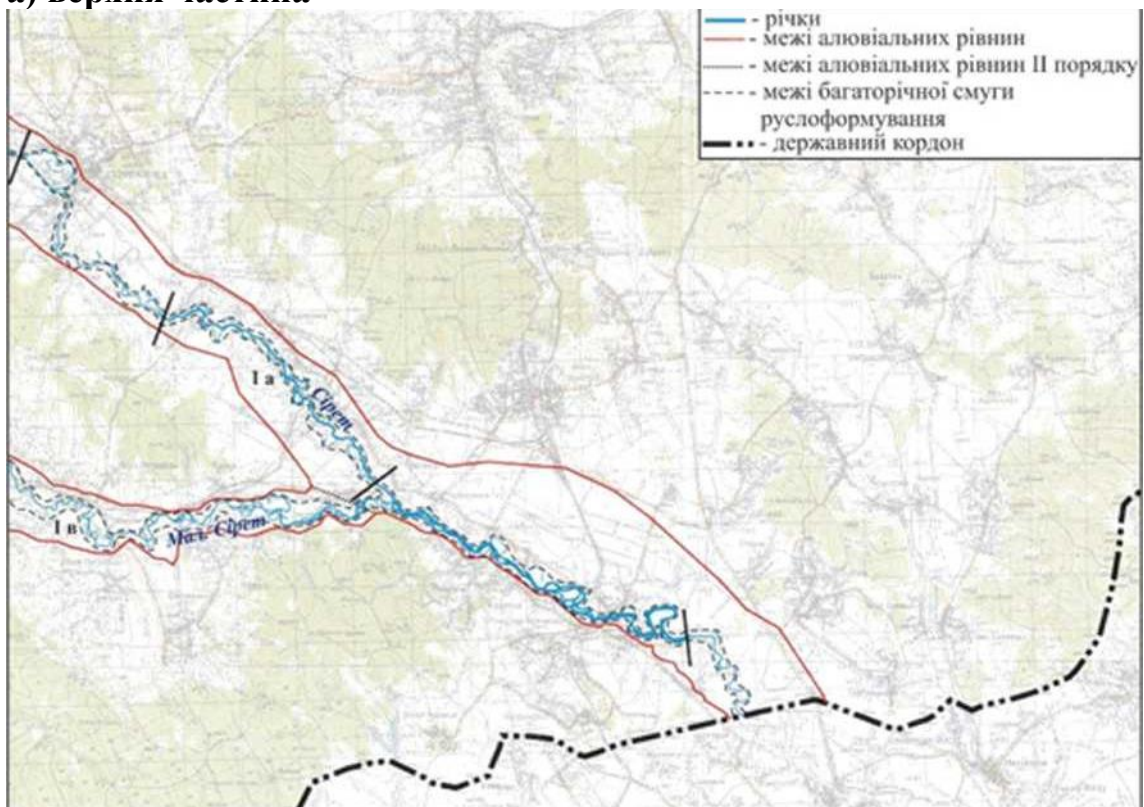
У межах ділянки між селами Луківці та Комарівці річка протікає через субширотну частину долини Пра-Черемошу. Тут положення русла та смуги руслоформування змінюється, що обумовлено як тектонічними впливами, так і тривалими процесами саморегуляції річки. Ця мінливість свідчить про активні геоморфологічні процеси, характерні для даного відрізка долини.

На ділянці між селами Комарівці та Панка долина Сірету набуває напрямку, характерного для Передкарпаття — північно-західного - південно-східного, що є паралельним до орографічної межі Карпат. На цій ділянці прадолина алювіальної



Ia - Сіретська (в межах України) алювіальна рівнина;
 Ib - Міхидро-Пра-Чсрсмоська ("Багна") успадкована алювіальна рівнина;
 Ib - Мало-Сіретська алювіальна рівнина

а) верхня частина



Ia - Сіретська (в межах України) алювіальна рівнина;
 Ib - Мало-Сіретська алювіальна рівнина

б - нижня частина

Рис.1.2. Алювіальні рівнини за даними Паланичко О.В.[6]

рівнини дещо звужується, але смуга руслоформування зберігає своє розташування під правим бортом долини. Така закономірність є типовою також для річки Прут і ряду інших передкарпатських річок, що свідчить про спільні особливості розвитку руслових процесів у даному регіоні.

В районі міста Сторожинець долина річки Сірет звужується, а смуга руслоформування набуває характерного вигину. Це явище схоже на так звані «Чернівецькі ворота» в долині Пруту, проте виражене значно слабше. Імовірно, такі зміни пов'язані з локальними тектонічними явищами, які впливають на формування річкових долин. Зокрема, помітний вплив підняття Цецино-Спаська та території у межиріччі Сірету й Малого Сірету. Ці підняття розташовані поперек до орографічної межі гір, що призводить до відхилення напрямків річкових долин.

На тектонічно зумовлену структуру долини та алювіальної рівнини накладається внутрішній розвиток гідрологічної системи «потік-русло» у перехідній зоні від гірської до напівгірської течії. Особливим чинником для річки Сірет є явище річкового перехоплення, а також успадкування форм і умов прадавньої долини. Це пояснює, чому на ділянці між Луківцями та Комарівцями спостерігається ефект гирлового подовження. У минулому Сірет був меншою притокою прадавнього Черемошу. З часом, на ділянці між Луківцями, Комарівцями та Сторожинцем, через слабкі гідродинамічні потоки, Сірет не встигав значно розширювати дно долини на тлі тектонічних піднять. Унаслідок цього смуга руслоформування врізалася в терасові рівні, а саме русло набуло складної будови, що адаптована до геоморфологічних умов.

Окремо варто відзначити розвиток великих успадкованих звивин у руслі Сірету, зокрема в районі річки Ліхидра. Ці звивини є результатом впливу процесів успадкування та поступового формування руслових форм. Подібне явище проявляється й у руслі самої Ліхидри, яке через свою низьку потужність демонструє ще яскравіші приклади цих процесів. Врізання русла, зміна масштабу руслових форм і розвиток звивин також були відзначені дослідницею В.Г. Смирною [9, 10] на ділянках, розташованих нижче міста Сторожинець. Ці

геоморфологічні зміни є характерними для динамічної еволюції річкових систем у передгірських умовах.

1.2. Ландшафти

Долинні комплекси займають унікальне місце серед ландшафтів суші завдяки своїй динамічності та різноманіттю. Вони формуються у тісному взаємозв'язку з провідним ландшафтотворчим чинником — річкою, що визначає їх розвиток та еволюцію. Особливо різноманітними є ці ландшафтні системи у передгір'ях, де вплив просторово-позиційних, літо- тектонічних та кліматичних чинників ускладнюється близькістю гірської системи. Долинні ландшафтні комплекси є одними з найдавніше освоєних людиною, що зумовило їх значну антропогенізацію. Саме такими властивостями характеризуються ландшафти долини річки Сірет у Буковинському Передкарпатті.

Долина річки Сірет формує ряд структурних типів, серед яких смугасто-ступінчастий, сітчастий, центрифугальний, перистий та мозаїчно-плямистий типи. Домінують два основних типи місцевості: терасові комплекси річки Сірет і долинні місцевості її приток. Терасові місцевості включають низькі, середні та високі тераси. Комплекс низьких терас охоплює заплаву, першу і другу надзаплавні тераси, середні — третю і четверту, а високі представлені п'ятою і шостою терасами.

Заплава річки Сірет є добре вираженою і часто обмежена крутим уступом заввишки 3-4 метри, який чітко відділяє її від першої надзаплавної тераси. Заплава складається з двох рівнів. Низька заплава, як правило, зберігається лише на вигинах меандр. Її поверхня є слабозадернованою, практично позбавленою ґрунтового покриву. Висока заплава розвинена по обидва береги річки, а її русло разом із заплавою має коритоподібний характер. У долинах бокових приток та балок заплавні місцевості мають значно менші розміри і складені суглинисто-галечниковим та глинисто-мулистим алювієм. На цих місцевостях формуються лучні та дерново-карбонатні оглеєні ґрунти [13].

Перша надзаплавна тераса є найбільш поширеною. Вона чітко відокремлюється уступом від заплави і виступає як ключовий елемент річкової долини. Друга надзаплавна тераса має менше поширення, проте вона різко піднімається над першою.

Третя надзаплавна тераса зустрічається у вигляді вузьких смуг, які найбільше поширені у центральній та західній частинах досліджуваної території. Її схили не завжди чітко виділяються, а часто друга тераса плавно переходить у третю. Водночас на деяких ділянках третя тераса круто піднімається над першою. Поверхня третьої тераси, як і другої, є похилою, що відрізняє її від першої надзапавної тераси [3].

Ці особливості свідчать про значну різноманітність долинних комплексів, обумовлену поєднанням природних і антропогенних чинників, що формують унікальний ландшафт долини річки Сірет у Передкарпатті.

Четверта надзаплавна тераса збереглася від розмиву боковими притоками значно краще, ніж друга і третя. Її урочища зустрічаються невеликими масивами по обидва боки долини річки Сірет, часто у вигляді окремих останців. У деяких місцях можна чітко виділити уступ четвертої тераси, що свідчить про її відносну стабільність. Склад тераси представлений лесоподібними суглинками та пілуватоглинистими відкладами, які залягають на давньому алювії великої потужності. Поверхня тераси слабко похила, але значно розчленована глибоко врізаними притоками. У структурі ландшафту помітні зсуви, що додають складності до геоморфологічного вигляду цієї місцевості.

Ґрунти переважають сірі та темно-сірі опідзолені, які в умовах вологих років піддаються підвищенню рівня ґрунтових вод. Ці місцевості менше розорані, ніж низькотерасові, і часто зайняті буково-ялицевими лісами та різнотравними луками. Таким чином, вони характеризуються ландшафтами лучно-лісового типу.

Місцевості високих терас займають найбільші площі на сході та в центральній частині досліджуваної території. Значна частина цих місцевостей є заселеною. П'ята тераса добре виражена, її уступ чітко відділяється від четвертої тераси. Натомість шоста тераса має нечіткі межі з п'ятою і плавно переходить у

корінний схил. Така слабка вираженість переходів зумовлена значною кількістю зсувів, які є характерною рисою цих ландшафтів.

Долини бокових притоків і великих балок широко представлені на території. Вони складаються з урочищ днищ та схилів різної крутизни, які формуються алювіально-делювіальними відкладами. Ці відклади мають різноманітний механічний склад і утворюють ґрунти, що відрізняються ступенем змитості. Особливістю долин бокових притоків є їх асиметричність. Схили цих долин часто прорізані мережею балок і ярів, де спостерігаються активні зсувні процеси.

Загалом структура ландшафтів цієї території має смугастий характер. Вона ускладнюється долинами бокових притоків, які формують перисті та дендритові структури урочищ, додаючи різноманітності до геоморфологічного вигляду регіону. Ці особливості підкреслюють складність та динамічність ландшафтів долини річки Сірет і її приток у межах досліджуваної території.

1.3. Клімат

Українська частина басейну річки Сірет, за винятком сточища річки Сучава, займає площу приблизно 1 700 км², що становить 21% від загальної площі Чернівецької області.

Досліджувана територія розташована в межах 47°56'00" пн. ш. і 25°11'50" -

26°10'38" сх. д., а її максимальна ширина сягає 23 км. Простягнувшись із заходу на схід на 63 км, басейн Верхнього Сірету межує: на півдні - з басейном річки Сучава, на заході - з басейном річки Черемош, на півночі - з басейном річки Прут. Східною межею є державний кордон між Україною та Румунією.

Різноманітність гіпсометричної структури басейну обумовлена значним перепадом висот: максимальні позначки в південно-західній частині сягають 1 300 м н.р.м., тоді як рівень врізу води в районі державного кордону на південному сході становить близько 305 м н.р.м. У зв'язку з цим територія поділяється на три основні гіпсометричні рівні. Долинний рівень, прив'язаний до Сіретської азональної низовини з висотами 300-400 м, займає 34,6% площі басейну.

Височинний рівень (400-500 м), представлений Прут-Сіретською та Передгірською височинами, покриває близько 26,2%. Гірський рівень охоплює низькогір'я та середньогір'я Буковинських Карпат із висотами від 500 до 1 300 м [2].

Природні особливості цієї території значною мірою визначаються інверсійним характером рельєфу та унікальністю долинно-річкових комплексів. Серед найвиразніших рис Буковинського Передкарпаття виділяються: пасмово-горбистий ерозійно-зсувний рельєф, широкі терасовані долини річок Сірет і Малий Сірет, розміри яких значно перевищують масштаби сучасних водних потоків, а також зональний характер природних умов.

Кліматичні особливості території басейну відзначаються значною мінливістю, що пов'язана з розташуванням передгір'їв Карпат у помірних широтах. Згідно з кліматичним районуванням М.С. Андріанова, Українські Карпати належать до області континентального клімату. Основні його риси формуються під впливом атлантичних і трансформованих континентальних повітряних мас. За дослідженнями А.І. Токмакова, клімат цієї території є помірно-континентальним, із достатнім зволоженням, непостійною весною, помірно теплим літом, лагідною осінню та м'якою зимою. Важливими чинниками є бар'єрний і висотний кліматоутворювальні ефекти, які впливають на динаміку температурного режиму й опадів.

Особливості клімату значною мірою зумовлені географічним положенням басейну щодо впливу адвекції атлантичного й континентального повітря та морфоструктур Карпатської гірської дуги. У гірських районах басейну орографічний чинник суттєво впливає на температурний режим. Як зазначав О.І. Токмаков, вертикальний температурний градієнт збільшується в період переходу від холодного сезону до літа та при переміщенні від високих гіпсометричних рівнів до нижчих, що робить цей регіон унікальним з точки зору кліматичних умов.

У зимовий період в межах басейну річки Сірет, особливо в передгірській частині, спостерігається значна кількість відлиг, які суттєво впливають на гідрологічний режим місцевих річок. Клімат гірської частини басейну

характеризується високою мінливістю. Циклони, що спричиняють інтенсивні опади на схилах гір, переважно зумовлені впливом Ісландського мінімуму або середземноморським відгалуженням полярного фронту. Найбільш активними вони є в холодну пору року, коли напрям вітру залежить від розташування гірських долин.

У долинах, що перетинають хребти поперечно, як-от Сірет, Малий Сірет і Сіретель, вітри значно посилюються. Проте в повздовжніх глибоких долинах притоків швидкість вітру суттєво знижується. Після виходу головної річки з гір у широку долину швидкість вітрів знову зростає через конвергенцію повітряних потоків у нижній тропосфері між гірськими хребтами та передгірською височиною.

Географічне положення басейну Сірету на північно-східному макросхилі Українських Карпат визначає специфічний розподіл опадів на території. У верхів'ях річки та її приток, зокрема в басейнах Лопушни, Стебника, Сухого, а також частково Миговки, Чудина і Гільчі, річна кількість опадів становить 900-1000 мм. У басейнах Міхідри, Жадовки, Пантина та Великого Солонця ці показники трохи нижчі — 800-900 мм. Решта площі басейну отримує в середньому 700-800 мм опадів на рік, що є значно меншим, ніж на навітряних схилах Карпат.

Це явище пояснюється тим, що при західному та південно-західному перенесенні повітряних мас більша частина вологи затримується на навітряних схилах, а лише незначна кількість досягає підвітряних територій. Водночас, за останніми спостереженнями, під час зливових дощів на вододільних ділянках Чернівецької, Тарашанської та Герцаївської височин фіксується більша кількість опадів, ніж на південно-східних схилах гірських хребтів. Це є свідченням впливу орографічного чинника на формування режиму опадів у басейні річки Сірет.

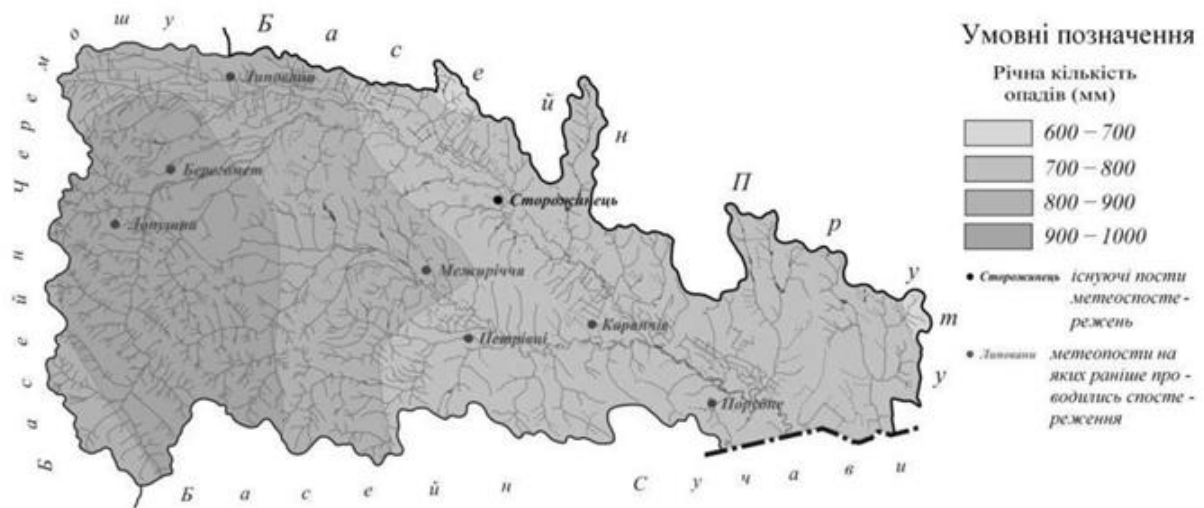


Рис. 1.3. Річна кількість опадів [5]

Просторовий розподіл опадів у теплий період року в басейні річки Сірет відрізняється від загального річного розподілу. Території, розташовані в середньогір'ї та низькогір'ї Карпат, отримують в середньому 700-800 мм опадів. Водночас у місцевостях витоків Сірету кількість опадів дещо менша — 600-700 мм. Це зумовлено впливом адвективно-циркуляційних процесів, які підсилюються орографічними умовами місцевих хребтів.

Сезонність метеорологічних величин на території басейну змінюється під впливом місцевих, переважно орографічних особливостей водозборів нижчого порядку. Основні закономірності сезонності є такими:

1. Зима триває в середньому чотири місяці. Для неї характерні часті відлиги, ожеледь, яка спостерігається 10-20 разів за сезон, а промерзання ґрунту є короткочасним або зовсім відсутнім.

2. Весна є затяжною і супроводжується різкими коливаннями температури. Початок весни затримується на два дні, а її завершення — на вісім днів із кожними додатковими 100 метрами висоти.

3. Літо триває від двох до чотирьох місяців залежно від висоти. На рівні 900-1 000 м періоди з температурою вище 15°C відсутні. З кожними 100 метрами висоти літо починається на 8-9 днів пізніше і закінчується на 5-6 днів раніше. Максимальна добова кількість опадів може досягати 100 мм, а кількість днів із градом становить п'ять-шість.

4. Осінь триває 3-3,5 місяця. Вона тепліша та сухіша за літо, із плавним зниженням температури. Перші заморозки можуть спостерігатися наприкінці серпня або на початку вересня.

Особливості клімату відображають унікальність погодних умов басейну річки Сірет, значною мірою зумовлену його географічним положенням і орографічною структурою.

1.4. Гідрологічні умови

Річка Сірет бере свій початок на північно-східних схилах Українських Карпат у Чернівецькій області, біля підніжжя гори Борсукової. Джерелом є злиття двох малих річок - Барсуки та Ластун, що знаходяться неподалік села Долішній Шепіт. Загальна довжина річки в межах області становить приблизно 109 км, а перепад висот на цій ділянці складає 435 м. Водозбір басейну розподілений нерівномірно за висотами: близько 40% площі знаходиться на висотах 400-600 м. Більшість приток річки є малими струмками, серед яких найбільшими є праві притоки Малий Сірет (61 км) і Мигова (21 км), а також ліві - Міхідра (32 км) і Котовець (18 км) [1].

Гідрологічний режим річки Сірет має яскраво виражену сезонність. Весняна повінь починається в травні, досягаючи пікових рівнів у третій декаді місяця. У місті Сторожинець підйом рівня води у цей період коливається від 0,4 до 1,3 м, іноді сягаючи 2,45 м (наприклад, у 1964 році). Серія дощових паводків, що спостерігається з квітня, має висоту підйому рівня від 0,6 до 2,8 м, а в багатоводні роки вона досягала 5,36 м (1969 рік). Розрахунковий рівень 1% забезпеченості становить 580 см над нулем водомірного поста в Сторожинці.

Під час паводків максимальні рівні води зазвичай перевищують рівні весняного водопілля. У період паводків швидкість підйому води в районі гідропоста Сторожинця сягає 148 см/добу, тоді як швидкість спаду становить 121 см/добу. Літні меженні рівні найнижчі в серпні-вересні, тоді як зимові рівні води зазвичай вищі за літні. У роки з зимовими відлигами рівень води може підніматися до 1,8 м (1947, 1948).

Розподіл стоку за сезонами є нерівномірним. Близько 42-45% річного стоку припадає на весну, тоді як у багатоводні роки до 60% стоку припадає на літо. Узимку стік становить лише 10-12% річного об'єму. Середня витрата води змінюється від 1,97 м³/с у селі Лопушна до 12,7 м³/с нижче гирла Малого Сірету. Під час весняного водопілля середня максимальна витрата води становить 40-50 м³/с, а в період літніх паводків - 60-160 м³/с. Максимальна витрата, зареєстрована в липні 1969 року, сягала 816 м³/с, тоді як мінімальна - 0,1 м³/с у серпні 1953 року.

Динаміка течії річки залежить від характеру долини. У верхів'ях, де річкова долина має ущелинний характер, середня швидкість течії становить 2,5 м/с. На ділянках нижче смт Берегомет, де русло утворює пороги та бистрини, швидкість знижується до 1,7 м/с, а поблизу села Стара Жадова - до 0,3-1,2 м/с.

Льодовий режим річки нестабільний, із середньою тривалістю льодових явищ у 90 днів. Лід зазвичай з'являється наприкінці листопада або на початку грудня, а його середня товщина становить 10-25 см, досягаючи максимуму в 60 см. Льодостав триває близько 30 днів у районі Лопушни та 65 днів у Сторожинці. Весняний льодохід короткочасний і не відбувається щороку, але в окремі роки на вигинах русла утворюються крижані затори.

Гідрологічні особливості річки Сірет є важливими для її водогосподарського використання та планування заходів зі зменшення ризику паводків.

1.5. Використання водних ресурсів басейну р.Сірет

Основна частина водопостачання в басейні річки Сірет здійснюється за рахунок підземних джерел, які забезпечують 94% загального об'єму водозабору. Водні ресурси басейну у період з 1990 до 2005 років використовувались переважно для потреб сільського господарства. Частка води, споживаної для сільськогосподарських потреб, варіювалась залежно від року від 44% до 75% загального об'єму водозабору (таблиця 1.1).

Інший обсяг забраної води використовувався для господарсько-питних і виробничих потреб. До 1996 року водоспоживання на виробничі потреби перевищувало споживання води населенням у 1,4-2,1 рази. Починаючи з 1997 року, частка виробничого водоспоживання значно скоротилась і стала меншою, ніж обсяги води, використаної для господарсько-питних потреб. У деякі роки виробниче водоспоживання складало лише 30-35% від обсягу, використаного населенням.

Протягом досліджуваного періоду, в окремі роки, у водні об'єкти басейну Сірету скидалося від 0,6 до 2,43 млн м³ стічних вод. Ці обсяги становили 0,15-0,61% середнього річного стоку річки, що вказує на відносно невисокий рівень забруднення водного басейну від скидів.

Такий розподіл водоспоживання та обсягів стічних вод свідчить про домінуючу роль сільського господарства у водокористуванні регіону, а також про зміни у виробничій діяльності, що вплинули на зменшення промислового водоспоживання в кінці аналізованого періоду.

Таблиця 1.1

Основні показники використання водних ресурсів в басейні р. Сірет.

Рік	Забір води по басейну			Використання води				Скид стічних вод в поверхневі водні об'єкти			
	ВСЬОГО	поверхневих вод	підземних вод	ВСЬОГО	на побутово-питні потреби	на виробничі потреби	на сільсько-господарські потреби	всього	забруднених стічних вод	нормативно-чистих вод без очиски	нормативно-очищених вод
1990	4,84	0,48	4,36	4,79	0,54	0,21	3,62	0,71	0,33	0,33	0,04
1991	7,04	2,55	4,49	6,98	1,10	1,41	2,80	1,80	0,46	1,13	0,21
1992	5,56	1,72	3,84	5,48	0,94	1,41	2,02	2,19	0,56	1,48	0,15
1993	6,09	2,18	3,91	6,02	0,97	1,07	2,50	2,10	0,55	1,41	0,14
1994	6,21	2,38	3,83	6,14	1,01	0,82	2,43	2,22	0,50	1,57	0,14
1995	6,14	2,52	3,62	6,09	1,04	1,09	2,04	2,43	0,56	1,77	0,11
1996	6,11	2,16	3,95	6,04	0,98	1,09	2,51	2,26	0,52	1,59	0,15
1997	5,20	1,70	3,50	5,14	0,89	0,42	2,47	1,66	0,56	1,10	0,06

1998	4,49	1,24	3,25	4,39	0,82	0,22	2,16	1,36	0,52	0,84	0,10
1999	4,46	1,44	3,02	4,42	0,78	0,26	1,99	1,44	0,46	0,98	0,0
2000	4,45	0,20	4,20	4,41	0,78	0,23	1,99	1,41	0,44	0,97	0,0
2001	4,50	0,27	4,23	4,44	0,58	0,20	3,47	0,60	0,41	0,19	0,0
2002	4,84	0,48	4,36	4,79	0,54	0,21	3,62	0,71	0,33	0,33	0,04
2003	5,73	1,48	4,24	5,68	0,46	0,31	3,60	1,65	0,39	1,25	0,0
2004	6,27	2,23	4,04	6,20	0,42	0,26	3,46	2,02	0,34	1,68	0,0
2005	6,37	2,51	3,86	6,32	0,41	0,15	3,13	2,07	0,30	1,76	0,02
2006	6,34	2,50	3,84	6,30	0,40	0,15	3,10	2,00	0,30	1,66	0,04
2007	6,48	2,54	3,94	6,41	0,39	0,21	3,11	1,93	0,27	1,46	0,02
2008	6,32	2,48	3,84	6,28	0,38	0,25	2,98	1,77	0,28	1,47	0,02
2009	5,66	2,00	3,66	5,48	0,36	0,21	2,77	1,69	0,30	1,37	0,02

Протягом окремих років досліджуваного періоду у водні об'єкти басейну річки Сірет скидалося від 0,6 до 2,43 млн м³ стічних вод, що становило 0,15-0,61% від середнього річного об'єму стоку. Основна частина цих стічних вод кваліфікувалася як нормативно чиста і скидалася у водні об'єкти без попереднього очищення. Частка стічних вод, які проходили через очисні споруди та були нормативно очищеними, не перевищувала 12% від загального обсягу.

Водночас значні обсяги забруднених стічних вод скидались у водні об'єкти без очищення, що сприяло зростанню екологічного навантаження на річкову екосистему.

Аналіз динаміки водокористування в басейні Сірету (рис. 1.4-1.6) демонструє, що в період до 2000 року спостерігалось загальне зниження обсягів водокористування. У період 2001-2005 років відзначено певну тенденцію до незначного збільшення водогосподарського навантаження, що свідчить про відновлення окремих секторів економіки. Проте в наступні роки, з 2006 по 2009 рік, відбулося поступове зменшення інтенсивності водогосподарського навантаження.



Рис. 1.4. Динаміка забору і скиду води в басейні р. Сірет (1990-2009 рр.)

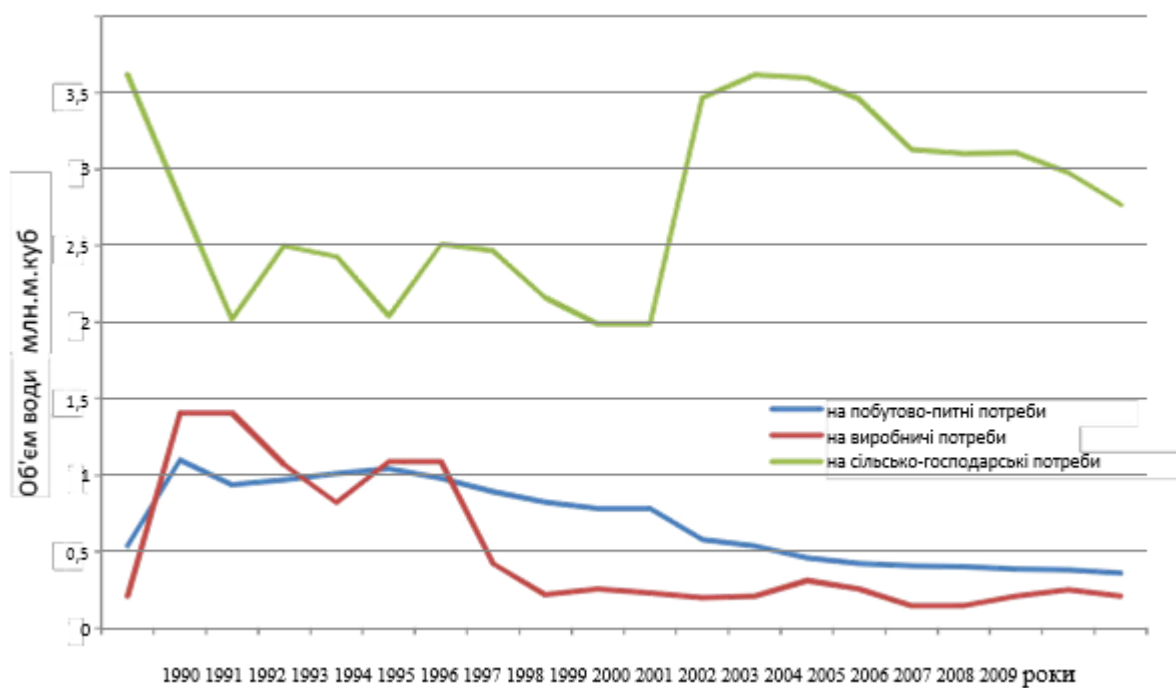


Рис. 1.5. Динаміка використання води в басейні р. Сірет.

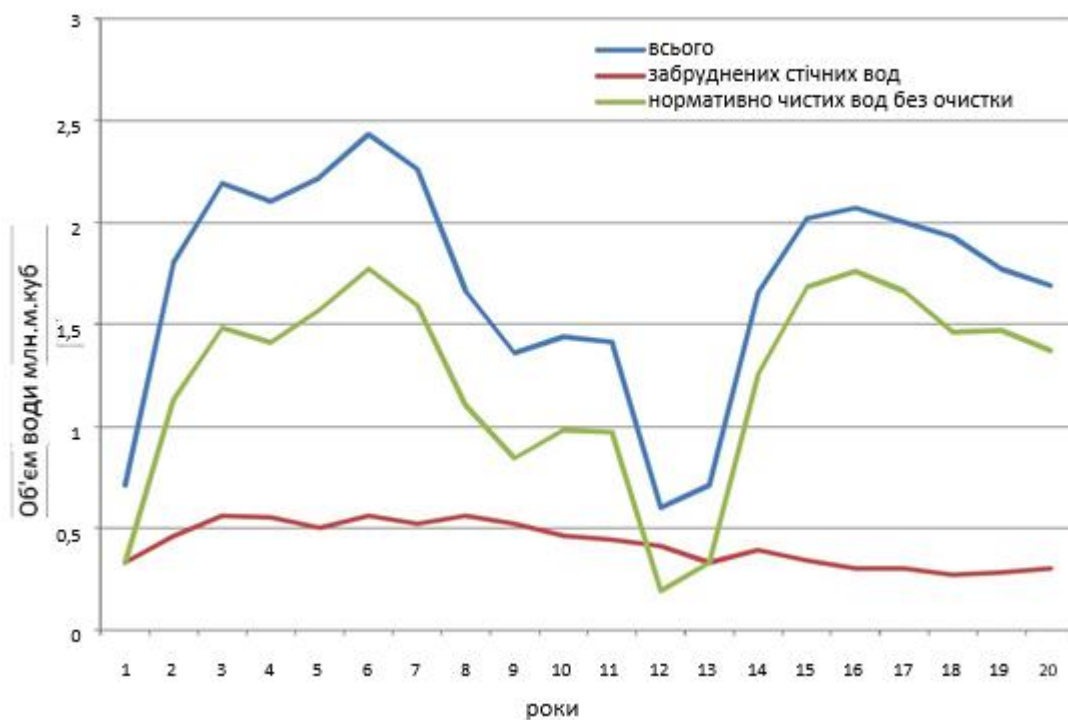


Рис 1.6. Динаміка і структура об'ємів водовідведення по басейну р. Сірет (1990-2009 рр)

Ці зміни відображають загальну тенденцію до скорочення водокористування, що, ймовірно, пов'язане зі зменшенням виробничої активності та впровадженням більш ощадливих методів водокористування. Однак висока частка забруднених стоків, які скидалися без очищення, залишається серйозною проблемою для екологічного стану басейну річки Сірет.

РОЗДІЛ II. ОГЛЯД ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для ефективного аналізу змін поверхні землі, а у випадку проведення нашого дослідження водних об'єктів, необхідно використовувати сучасне програмне забезпечення, яке забезпечує доступ до супутникових даних, їхню обробку та аналіз. У цьому пункті розглянемо основне програмне забезпечення яке ми використовували для проведення досліджень: EO Browser, QGIS 3.34, та ArcGIS 10.4.

EO Browser є безкоштовною платформою для доступу до супутникових знімків, яка дозволяє переглядати, аналізувати та завантажувати дані з різних супутникових місій, таких як Sentinel та Landsat. Вона забезпечує зручні інструменти для порівняння знімків, використання спектральних індексів (наприклад, NDVI для вегетації чи MNDWI для води) та побудови таймлапсів.

QGIS 3.34 — це відкрите програмне забезпечення для роботи з геопросторовими даними. Воно дозволяє виконувати просторовий аналіз, візуалізувати зміни ландшафту, створювати тематичні карти та обробляти супутникові знімки за допомогою плагінів, зокрема для обробки даних водних об'єктів та автоматизації обчислень.

ArcGIS 10.4 є потужною комерційною ГІС-платформою з можливістю пробного місячного використання, що надає розширені інструменти для геообробки, аналізу та візуалізації даних. Для дослідження водних об'єктів ArcGIS пропонує функції обробки гідрологічних даних, моделювання потоків і створення тривимірних моделей ландшафтів [18].

Кожна з цих платформ має унікальні переваги, які роблять їх незамінними у дослідженнях поверхні землі та моніторингу водних ресурсів. У наступному підрозділі буде детально розглянуто їхні можливості та застосування в рамках цього дослідження.

2.1. Огляд EO Browser як засобу для дослідження поверхні планети та водних об'єктів на ній

EO Browser - це зручна платформа для супутникових зображень, яка надає потужні можливості для річкових систем. Його основні переваги:

1. Браузер EO - це безкоштовний інструмент, який надає чудові можливості для користувачів, не купуючи дороге програмне забезпечення [31].
2. Платформа поєднує дані Sentinel, Landsat, Modis та інших, що дозволяє дослідникам вибирати оптимальні зображення для аналізу процесів каналу [21].
3. Браузер EO дозволяє візуалізувати дані в різних спектральних діапазонах, використовувати спектральні індекси для аналізу водних об'єктів та зміна відстеження з часовими часами [30].
4. Користувачі можуть встановити межі дослідження, вибрати часові рамки та вибрати зображення з мінімальним хмарним покриттям, який є критичним для аналізу річки [30].
5. Завантаження зображень у форматах геотифу або JPEG забезпечує зручність для обробки в таких програмах, як QGIS або ArcGIS [24, 31].

Під час нашого дослідження ви можете вибрати супутники, які відповідають вам типу інформації, яку вони надають. Наш вибір зупинився на супутниках Landsat 4-5 та 8-9 просторів через те, що час місії є досить значним і дозволяє проаналізувати як час, так і просторові зміни в положенні водних об'єктів.

Крім того, супутники Landsat надають неоціненні дані для тривалого моніторингу річок -систем:

1. Супутники Landsat зберігають дані з 1972 року, що дозволяє вивчати зміни в річкових ліжках у тривалому аспекті [29].

2. Landsat 4-5 мав роздільну здатність 30 м для світловідбиваючих каналів і 120 м для теплових зображень, тоді як Landsat 8-9 покращив ці параметри до 15 м для панхроматичного каналу [29]. Панхроматичний канал (B8) був доданий до місії Landsat 7 та всіх наступних, із роздільною здатністю 15 метрів. Він

охоплював спектр 0.52–0.90 мкм, включаючи частини видимого і ближнього інфрачервоного діапазонів.

3. Датчики TM та OLI покриваються видимими, поблизу інфрачервоних та середніх інфрачервоних діапазонів, що дозволяє виявити водні предмети, змінювати узбережжя та стан рослинності [20].

4. 16-денний цикл забезпечує постійне оновлення даних, необхідних для моніторингу систем річки в різні сезони [30].

5. Дані Landsat є безкоштовними, що забезпечує доступність для досліджень у всьому світі [31].

Протягом багатьох років супутники Landsat зазнали значного розвитку, що дозволило значно покращити якість зображень, їх просторову, спектральну та радіометричну роздільну здатність.

Космічні зображення місії Супутникової місії Landsat 4-5, яка працювала з 1982 по 2013 рік, стала важливим джерелом даних для моніторингу земної поверхні та аналізу водних об'єктів. Ці зображення забезпечили високоякісне покриття площі просторовою роздільною здатністю 30 метрів для відбивних і 120 метрів для термічного інфрачервоного каналу. Формат Getififf, який використовувався для розподілу даних, включав окремі файли для кожного спектрального каналу (BEND), який значно сприяло їх подальшій обробці та аналізу.

Landsat 4-5 був оснащений багатоспектральними сканерами TM (Thematic Mapper), які розширили можливість зйомки порівняно з попередніми місіями:

1. Синій (Blue, B1): 0,45–0,52 мкм - аналіз водних об'єктів, глибина води.
2. Зелений (Green, B2): 0,52–0,60 мкм - моніторинг рослинності.
3. Червоний, (Red, B3): 0,63–0,69 мкм - Ідентифікація меж рослинності та стан ґрунту.
4. Ближній інфрачервоний (NIR, B4): 0,76–0,90 мкм - аналіз водного стресу в рослинності, ідентифікація водних об'єктів.
5. Середній інфрачервоний (SWIR1, B5): 1,55–1,75 мкм - Оцінка вологості ґрунту та рослинності.

6. Середній інфрачервоний (SWIR2, B7): 2,08-2,35 мкм - геологічні дослідження. Тепловий інфрачервоний (TIR, B6): 10,40–12,50 мкм — вимірювання температури поверхні землі.

Космічні зображення Landsat 4-5 стали важливим інструментом для аналізу змін на обкладинці Землі, вивчення динаміки водних ресурсів та моніторингу екосистем. Їх високий рівень деталізації та можливість мульти -спектрального аналізу відкрили нові горизонти наукових досліджень та практичних застосувань.

Зображення, які ми отримали від Landsat 4-5, мали формат геотифу, який включає окремі файли для кожного каналу. Ці зображення використовуються для аналізу змін на обкладинці Землі, вивчення водних об'єктів та для моніторингу екосистем.

Космічні зображення місії Landsat 8-9, яка почала працювати в 2013 році та продовжується, є наступним етапом у розробці технологій моніторингу супутника. Вони забезпечують ще більшу якість даних через вдосконалену просторову, спектральну та радіометричну роздільну здатність. Фотографії наведені у форматі geo.tiff, який включає окремі файли для кожного спектрального каналу, що забезпечує гнучкість у їх аналізі. Просторова роздільна здатність становить 30 метрів для відбивних, 15 метрів для панхроматичного каналу та 100 метрів для термічних інфрачервоних каналів [24].

Landsat 8-9 оснащені датчиками оперативного зображення земель (OLI) та термічним інфрачервоним датчиком (TIRS), який значно розширив діапазон застосувань. Загалом Олі охоплює 9 відбиваючих каналів та панхроматичного каналу, тоді як TIRS додає два теплові канали для аналізу температури земної поверхні.

Тож космічні зображення Landsat 8-9 надають багатоспектральний аналіз завдяки 11 каналам (Bendam), кожен з яких має свою функціональну мету:

- Прибережний аерозоль (B1): 0,43–0,45 мкм - аналіз прибережних зон та аерозолів.
- Синій (Blue, B2): 0,45–0,51 мкм - водні предмети.
- Зелений (Green, B3): 0,53–0,59 мкм - Виявлення змін рослинності.

- Червоний (Red, B4): 0,64–0,67 мкм - Оцінка здоров'я рослинності.
- Близький інфрачервоний (NIR, B5): 0,85–0,88 мкм - відображення водних об'єктів.
- Середній інфрачервоний (SWIR1, B6): 1,57–1,65 мкм - Оцінка вологості ґрунту.
- Середній інфрачервоний (SWIR2, B7): 2,11-2,29 мкм - геологічні аналізи.
- Панхроматичний (B8): 0,50-0,68 мкм - висока роздільна здатність (15 м).
- Короткий хвильовий інфрачервоний (Cirrus, B9): 1,36–1,38 мкм - виявлення високих хмар.
- Теплово -інфрачервоний (TIRS1, B10): 10,60–11,19 мкм - температура поверхні.
- Теплово -інфрачервоний (TIRS2, B11): 11,50–12,51 мкм - вдосконалення температурного аналізу [20].

Поліпшення ТМ до технології OLI надало дослідникам можливість отримувати високу якість даних з більш високою просторовою та радіометричною роздільною здатністю. Завдяки додатковим спектральним каналам та зручному формату файлу.

Використання браузера EO та супутників Landsat дозволяє проводити всебічні дослідження процесів русла річки. Пишучи цю кваліфікаційну роботу, ми використовували Landsat 4-5 пробілів для 1984, 1994, 2004, а також Landsat 8-9 за 2014 та 2024 роки. Замовлення можна стверджувати, що ця платформа забезпечує доступ до якості, тоді як Landsat пропонує високий-високий-високий-точні зображення протягом багатьох років аналізу.

2.2. Огляд можливостей QGIS 3.34 для аналізу водних об'єктів та визначення коефіцієнта звивистості

QGIS 3.34 - це потужний інструмент для роботи з геопросторовими даними, що дозволяє провести всебічний аналіз космонів, зокрема для виявлення, класифікації та моніторингу водних об'єктів. Завдяки своїм

інструментам, таким як растровий калькулятор та можливість обробляти дані, можна створити точні моделі покриття води.

QGIS надає дослідження, але вам потрібно завантажувати дані з платформ, таких як USGS Earth Explorer або браузер EO, у форматі Geotif. Космони Landsat 4-5 (TM) та Landsat 8-9 (OLI) мають окремі спектральні канали (бренди), кожен з яких являє собою певний діапазон спектру. Ці канали імпортуються в QGI і відображаються як окремі шари Bitmap.

Щоб розробити космони, важливо перевірити якість даних та налаштувати їх для подальшого аналізу. Зокрема, ви повинні звернути увагу на просторове вкладення даних, коригуючи їх з опорними точками, щоб забезпечити точність аналізу [23].

У випадку мульти-спектрального аналізу космос потребує попереднього повідомлення. Цей процес передбачає створення композицій з декількох беодів, що полегшує аналіз та підвищення точності. Наприклад:

- Використовуються кольорові композиції: червоні (B4), зелені (B3) та сині (B2) спектри (B2).
- Аналіз водних об'єктів: інтегрований поблизу інфрачервоного (NIR, B5) та середнього інфрачервоного (SWIR1, B6).

Зручно використовувати формат Float32 при поєднанні даних. Цей формат дозволяє зберігати дані з плаваючою точкою, яка забезпечує високу точність при виконанні обчислень у растровому калькуляторі [17]. Це особливо корисно для аналізу спектральних індексів, таких як NDWI, де потрібна точність значень для визначення покриття води [16].

Нормалізований індекс води різного розгляду (NDWI) - це спектральний індекс, який дозволяє виділити водні предмети на просторі. Він обчислюється формулою:

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

де:

- Зелене значення відбиття в зеленому діапазоні (B2 для Landsat 4-5, B3 для Landsat 8-9).

- NIR-значення відбиття в майже інфрачервоному діапазоні (B4 для Landsat 4-5, B5 для Landsat 8-9).

Розрахунок NDWI в QGIS використовує можливості програмного забезпечення для аналізу супутникових зображень для виявлення та вивчення водних об'єктів. Цей індекс, вивчаючи поверхню планети, може ефективно ідентифікувати водойми у великих районах.

Використання NDWI в QGIS дозволяє:

- Моніторинг змін у водоймах: відстежувати динаміку озер, річок та інших водних ресурсів з часом.

- Проаналізуйте вплив факторів: для оцінки впливу кліматичних змін або діяльності людини на стан водних об'єктів.

- План управління ресурсами: надайте дані для прийняття рішень у галузі екології та управління водою.

Використання Float32 під час розрахунків гарантує високу точність даних, що є критично важливим для точності результатів. Як результат, цей процес є важливим інструментом для гідрологічних досліджень і сприяє глибшого розуміння стану та динаміки водних об'єктів.

QGIS 3.34 - це потужний інструмент для обробки космічних зображень та аналізу водойм. Після обчислення NDWI за допомогою растрового калькулятора отримують інтегрований растровий, де позитивні значення вказують на наявність водних поверхонь, а негативні - щодо інших типів поверхні. Такий підхід дозволяє ефективно ідентифікувати водойми та відокремити їх від навколишнього середовища.

Для аналізу змін у водоймах протягом різних періодів часу QGIS дозволяє перетворити растрові карти у формат вектора. Використовуючи інструмент з полігенізації (вектор), Raster NDWI перетворюється на векторний шар, який представляє контури покриття води. Це відкриває додаткові можливості для редагування, аналізу та порівняння векторних даних, що важливо для вивчення динаміки водних об'єктів.

Порівняння векторних шарів, створених на основі космічних зображень різних періодів, здійснюється шляхом введення їх у QGIS. Інструмент різниці виявляє відмінності між векторними шарами, визначення ділянок змін у водному покриву. Цей метод є ефективним для детального аналізу динаміки річкових грядців та оцінки впливу природних або антропогенних факторів на їх стан. Це дає можливість кількісно визначити зміни, такі як розширення або звуження ліжок, та визначити причини цих змін [21].

Окрім основних функцій, QGIS 3.34 пропонує широкий спектр інструментів для детального аналізу космічних зображень. Зокрема, підтримується використання різних спектральних індексів, що посилює здатність ідентифікувати водойми. Наприклад, модифікований нормалізований індекс води (MNDWI) та автоматизований індекс вилучення води (AWEI) можуть бути більш ефективними у міських районах, оскільки зменшують вплив будівельних матеріалів на результати аналізу [36].

QGIS підтримує як неконтрольовану, так і контрольовану класифікацію зображень. Використання плагінів, таких як "напівавтоматичний плагін класифікації" (SCP), спрощує процес класифікації та автоматизує багато завдань [16]. SCP дозволяє завантажувати космічні зображення безпосередньо з інтерфейсу QGIS, виконувати попередню обробку даних, включаючи корекцію атмосфери, створити навчальні зони для контрольованої класифікації та оцінити її точність за допомогою неточностей.

Для підвищення точності аналізу QGIS він підтримує атмосферну корекцію космічних зображень. Це зменшує вплив атмосферних умов на відбивну здатність поверхні, що є критичним для точності результатів [15]. Інтеграція з пакетом Grass GIS дозволяє використовувати плагін i.atcorr для виконання атмосферної корекції безпосередньо в QGIS.

Практичні вказівки щодо ефективного використання QGIS включають перевірку якості даних перед обробкою, використовуючи калібрувальні мітки та метадані для правильного коригування здатності відбиття каналів, а також документацію процесу обробки для забезпечення повторення та відтворення результатів.

2.3. Огляд можливостей ArcGIS 10.4 для роботи з картами та дослідження водних об'єктів.

ArcGIS 10.4 - це потужне програмне забезпечення для систем геоінформації (ГІС), яке забезпечує широкий спектр інструментів для роботи з геопросторовими даними. Це особливо корисно для роботи з історичними картами середини -19 століття, що дозволяє їм виконувати гео -типацію, аналіз та інтеграцію з сучасними даними [18]. Завдяки інструментам ArcGIS дослідники можуть ефективно вивчати річки, їх канали та басейни, а також аналізувати зміни, що відбулися в останні століття.

Перший крок - це оцифровка та імпорт історичних карт у ArcGIS. Відскановані картки зберігаються у форматах TIFF, JPEG або в інших растротах. Після імпорту вони відображаються як растрові шари, готові до подальшої обробки.

ArcGIS 10.4 надає інструмент інструменту «Геопривязка» для растр - зображень. Цей процес дозволяє точно розміщувати історичні карти на сучасній системі координат, яка є критичною для аналізу змін на місцевості з часом.

Перший крок - визначити реперні пункти для прив'язування карт пункти. Це передбачає вибір добре відомих точок репера на історичній карті та пошуку своїх листів на сучасній карті або безпосередньо на місцевості. Такі моменти можуть бути перехрестями доріг, мостів, церков або інших предметів, які тривалий час залишаються незмінними. Використання реперних, контрольних пунктів забезпечує високу точність та мінімізує спотворення.

Наступним етапом є використання перетворень. ArcGIS підтримує різні методи трансформації, такі як лінійний, поліном (поліном) та сплайн. Кожен метод має свої характеристики і підходить для певних типів спотворень на карті. Наприклад, лінійна трансформація підходить для корекції простих спотворень, тоді як поліном може впоратися з більш складними деформаціями. Правильний вибір методу трансформації дозволяє максимально точно вирівняти історичну карту [18].

Після використання трансформації важливо оцінити точність гео - зведення. Для цього ArcGIS надає вам можливість перевірити залишкові помилки (залишки) для кожної контрольної точки. Аналіз цих помилок допомагає визначити, наскільки точно було зроблено геопривязку і, якщо необхідно, внести коригування. Це забезпечує високу якість карт, що були привязні та підвищує точність подальшого аналізу.

Існує кілька методів передачі, які можна застосувати залежно від природи спотворень на історичній карті. Одним з найпоширеніших є лінійна трансформація. Цей метод використовується, коли вам потрібно зробити просте масштабування, обертання та зсув зображення. Для використання лінійної трансформації необхідні щонайменше три контрольні -пропускні пункти. Він ефективний для карт, де спотворення мінімальні та лінійні.

Поліноміальна трансформація - це більш складний метод, який підходить для корекції значних спотворень. Ступінь полінома визначає, як можна виправити складні деформації: поліном першого замовлення використовується для простих спотворень, а полінома другого та третього порядків - для більш складних. Цей метод дозволяє розглянути нелінійні спотворення, які поширені на старих картах через неточні вимірювання або деформацію паперу.

Точність та надійність аналізу забезпечуються потужними інструментами та проекціями, що зв'язують гео. ArcGIS надає можливість для точного приєднання історичних карт до сучасних систем координат, що є критично важливим для виявлення змін річок з часом. Крім того, вибір відповідної проекції мінімізує спотворення та підвищує точність результатів.

Гнучкість та масштабованість ARCGIS дозволяють використовувати його для місцевих досліджень малих річок та для великого аналізу великих колекцій води. Програма адаптується до потреб користувача, забезпечуючи як прості візуалізації, так і складні гідрологічні моделі. Це робить ArcGIS 10.4 ефективним інструментом для географів, екологів, інженерів та інших фахівців, зацікавлених у вивченні водних систем [18].

Працюючи з ArcGIS 10.4, важливо дотримуватися деяких практичних рекомендацій для досягнення найкращих результатів. Перш за все, слід звернути

увагу на перевірку якості перед початком роботи. Історичні карти можуть мати спотворення, пошкодження або неточності, тому їх попередній аналіз допоможе визначити можливі проблеми та визначити необхідні кроки для їх усунення.

Використання додаткових модулів може значно розширити можливості програми. Наприклад, ARC Hydro Tool - це спеціалізоване розширення для ArcGIS, що забезпечує додаткові інструменти для гідрологічного аналізу та роботи з водоймами [18]. Використання таких інструментів збільшує точність та ефективність аналізу, що дозволяє виконувати складні обчислення та моделювання.

ArcGIS 10.4 -це незамінний інструмент для вивчення річок, їхніх ліжок та басейнів, особливо при роботі з історичними картами середини -19 століття. Завдяки можливостям точного гео -типу, гнучкого вибору проекції та потужними інструментами гідрологічного аналізу дослідники можуть глибоко вивчити зміни водних систем, спричинених як природними, так і антропогенними факторами. Зручність використання та широкий спектр функцій роблять ArcGIS 10.4 ефективним рішенням для географів, істориків та екологів, зацікавлених у детальному аналізі річкових систем.

ArcGIS 10.4 підтримує широкий спектр систем координат та картографічних проекцій, що дозволяє користувачам вибрати найкращий варіант для своїх досліджень. Вибір правильної проекції є надзвичайно важливим для забезпечення точності аналізу, оскільки різні проекції можуть суттєво вплинути на форму, площу та відстань на карті [18].

Програма показує стандартні прогнози, які можна легко вибрати відповідно до географічного розташування та масштабу дослідження. Наприклад, для роботи з територією України часто використовується проекція Великобританії або проекції Гаусса-Кругера. Використання побудованих проекцій спрощує процес налаштування та гарантує сумісність з іншими геодами.

Якщо стандартні прогнози не відповідають конкретним вимогам дослідження, ArcGIS дозволяє створювати спеціальні прогнози. Це дає можливість встановити власні параметри еліпсоїду, дати та інших характеристик, що особливо корисно при роботі з історичними картами, які можна створити в унікальних або застарілих системах координат [16].

Крім того, ARCGIS надає інструменти перетворення координат, що дозволяє перетворювати дані з однієї системи координат в іншу. Це забезпечує сумісність різних наборів даних і дозволяє інтегрувати історичні карти з сучасними геопросторовими даними, полегшенням аналізу та порівняння.

ArcGIS 10.4 пропонує потужні інструменти для детального вивчення річок, їхніх річкових переформувань. Використовуючи цифрові моделі місцевості, створені на основі даних про високу кількість, ви можете моделювати місцевість та визначити напрямки поверхневого стоку. Це дозволяє визначити природні шляхи водотоків, визначати місця побудови каналів і гідротехнічних споруд та аналізувати їх морфологічні характеристики [22].

Інструменти гідрологічного аналізу, доступні в просторовій панелі інструментів аналітика, дозволяють проводити розрахунки стоку, визначити основні та незначні руслі річки та аналізувати параметри, такі як швидкість потоку, об'єм стоку та інші гідрологічні показники. Це особливо корисно для оцінки гідрологічних ризиків, планування водних ресурсів та моніторингу навколишнього середовища.

Порівнюючи історичні картки, що призначаються для ГІС аналізу з сучасними даними дистанційного зондування Землі, дослідники можуть відстежувати зміни в руслових процесах в останні століття. Це відкриває здатність аналізувати вплив природних факторів, таких як кліматичні зміни та антропогенні фактори, такі як побудова дамб або рекультиваційна інфраструктура, на динаміку річкових систем. Такий всеосяжний підхід сприяє глибокому розумінню процесів, що відбуваються в річкових басейнах, і може бути використаний для розробки стратегій сталого управління водою [17].

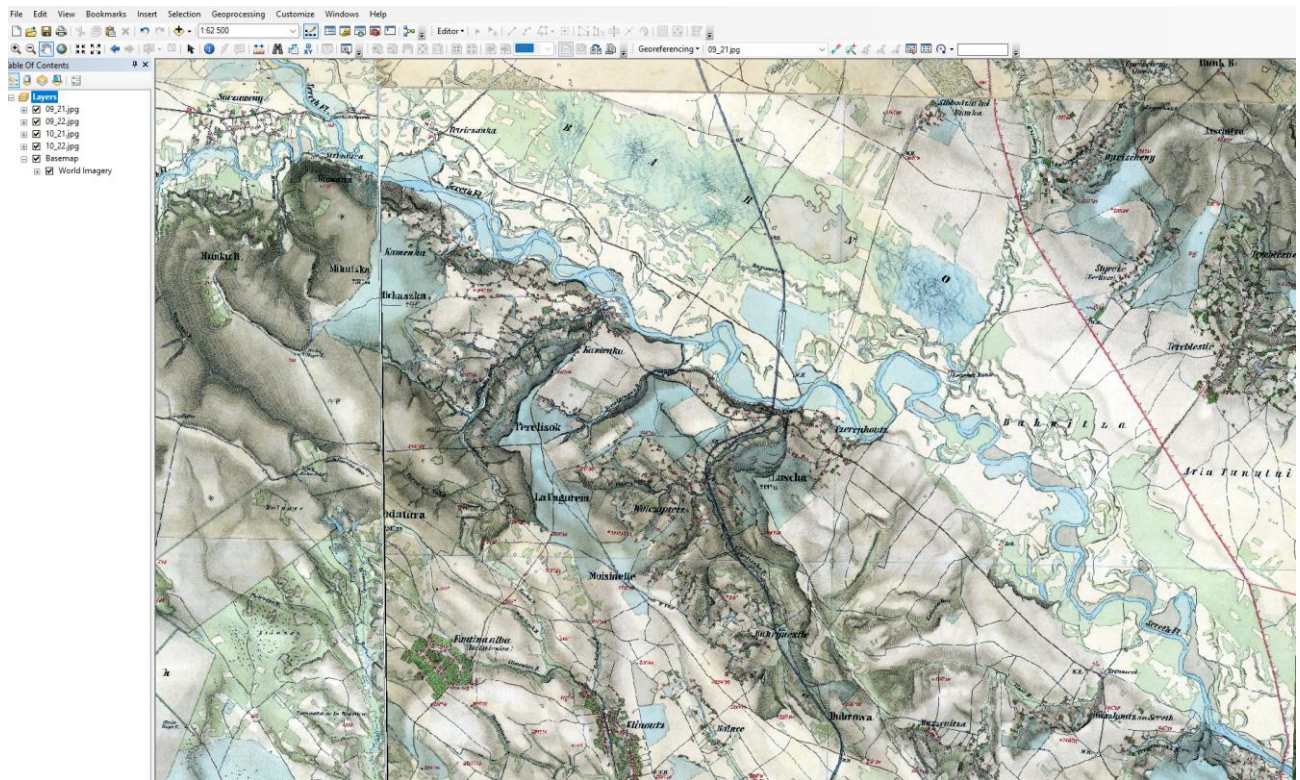
ArcGIS 10.4 має ряд переваг, які роблять його незамінним інструментом для вивчення річок та їхніх пулів. Однією з ключових переваг є можливість інтегрувати різні дані. Програма дозволяє вам працювати як з растровими, так і з векторними даними, включаючи історичні карти, сучасні супутникові зображення, цифрові моделі місцевості та інші геопросторові дані. Це забезпечує всебічний підхід до аналізу, де можна поєднувати різні типи даних, щоб отримати більш повну картину досліджуваних об'єктів.

РОЗДІЛ III. ВІДПРАЦЮВАННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАНОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ДІЛЯНЦІ РІЧКИ СІРЕТ З ВИКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ ГІС ТЕХНОЛОГІЙ.

3.1. Опрацювання карт 1860-х- 1950-х років з допомогою ArcGIS та QGIS

Вивчення історичних змін русел річок є важливим елементом аналізу динаміки молодих річкових ландшафтів і водних екосистем. Історичні карти, створені у XIX столітті, становлять цінне джерело інформації для реконструкції минулого стану річкових систем і прилеглих територій. Аналіз таких матеріалів дозволяє оцінити вплив природних і антропогенних чинників на зміну русел, що, у свою чергу, сприяє більш глибокому розумінню сучасних процесів у басейнах річок.

Для дослідження планових деформацій русла річки Сірет на ділянці від гирла Малого Сірету до українсько-румунського кордону було використано старі карти 1860-х та 1950-х років. Ця ділянка охоплює ключові природні й антропогенно змінені території, що дозволяє провести комплексний аналіз руслових процесів і стану прилеглих земель. Прив'язка карт до сучасних географічних координат стала основою для подальшого оцифрування та моделювання русла річки, відкриваючи нові можливості для вивчення змін водних систем у цьому регіоні.



**Рис. 3.1. Картографічний матеріал 1860-тих років прив'язаний в
ArcGIS 10.4**

Дослідження з використанням історичних карт у поєднанні з сучасними геоінформаційними технологіями, такими як ArcGIS 10.4, є надзвичайно актуальним і практичним. Це забезпечує високу точність реконструкції та дозволяє інтегрувати отримані дані в подальший аналіз динаміки водних ресурсів, ризиків повеней та інших екологічних аспектів.

Геоприв'язка старих карт 1860-х та 1950-х років для басейну річки Сірет на ділянці від гирла Малого Сірету до українсько-румунського кордону була виконана з використанням програмного забезпечення ArcGIS 10.4 (demo version). Ця ділянка охоплює територію між селами Петричанка та Новий Вовчинець і є ключовою для аналізу історичних змін русла річки та прилеглих територій. Використання історичних карт дозволяє відстежувати довготривалі природні та антропогенні процеси в басейні річки.

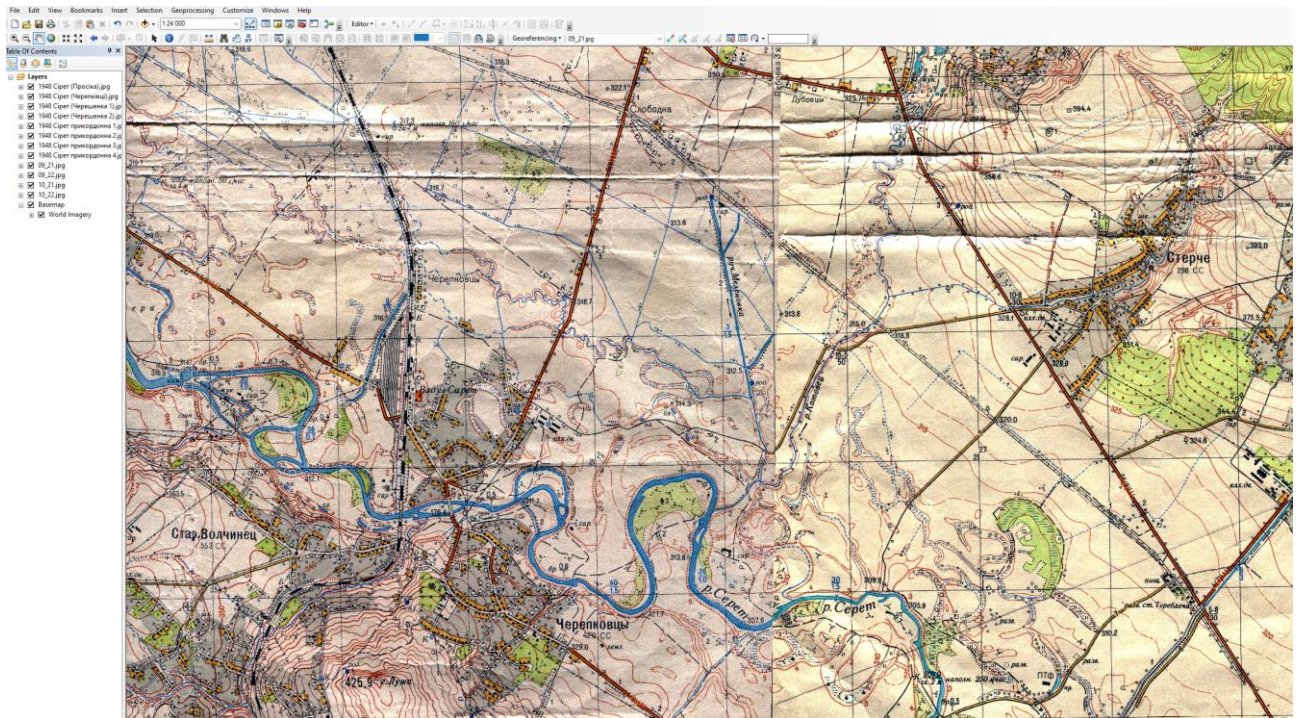


Рис. 3.2. Картографічний матеріал 1950 років прив'язаний в ArcGIS

10.4

Даний картографічний матеріал було отримано з Баз картографічних даних кафедри географії України та регіоналістики. Оскільки основним програмним інструментом нашої роботи буде QGIS 3.34 було вирішено перенести картографічний матеріал саме в цю програму.

Наступним завданням було зміна репроекцію карт до сучасної системи координат: WGS 84 (EPSG: 4326). Саме ця координатна система була обрана нами за основну в нашому проекті.

Для переведення системи координат прив'язаних карт 1860-х і 1950-х років для подальшої роботи в QGIS 3.34 та векторизації русел у полігоні потрібно дотримуватися чіткої послідовності дій.

Для переведення карт, прив'язаних у системі координат Pulkovo 1942, до системи WGS 84 (EPSG: 4326) в QGIS 3.34, необхідно дотримуватись певної послідовності дій. Спершу потрібно завантажити карту до програми, використовуючи стандартний інструмент для додавання растрових шарів. При завантаженні слід переконатися, що карта має правильну прив'язку до системи Pulkovo 1942. Це можна перевірити у властивостях шару, де вказана система координат (CRS).

Для експорту карт потрібно їх перезберегти у новій системі координат. У QGIS це робиться за допомогою опції експорту шару. Під час збереження обирається новий формат, наприклад GeoTIFF, а в параметрах системи координат задається WGS 84 (EPSG: 4326). При збереженні важливо перевірити інші налаштування, зокрема роздільну здатність, яка зазвичай залишається за замовчуванням, якщо немає специфічних вимог. Вказавши нове ім'я файлу та місце збереження, можна завершити процес репроекції.

Після збереження нового файлу його варто знову завантажити в QGIS, щоб переконатися у правильності виконаної роботи. У властивостях шару перевіряється, чи система координат змінилася на WGS 84, а також виконується візуальна перевірка суміщення карти з іншими шарами, такими як супутникові зображення чи глобальні карти, наприклад, OpenStreetMap. Якщо всі етапи виконано правильно, карта буде коректно відображена у координат.

Отримана карта тепер готова для подальшої обробки. У WGS 84 з нею можна виконувати векторизацію, аналіз і інтеграцію з іншими геопросгоровими даними. Такий підхід забезпечує точність переведення координат коректну інтеграцію даних на наступних етапах роботи.

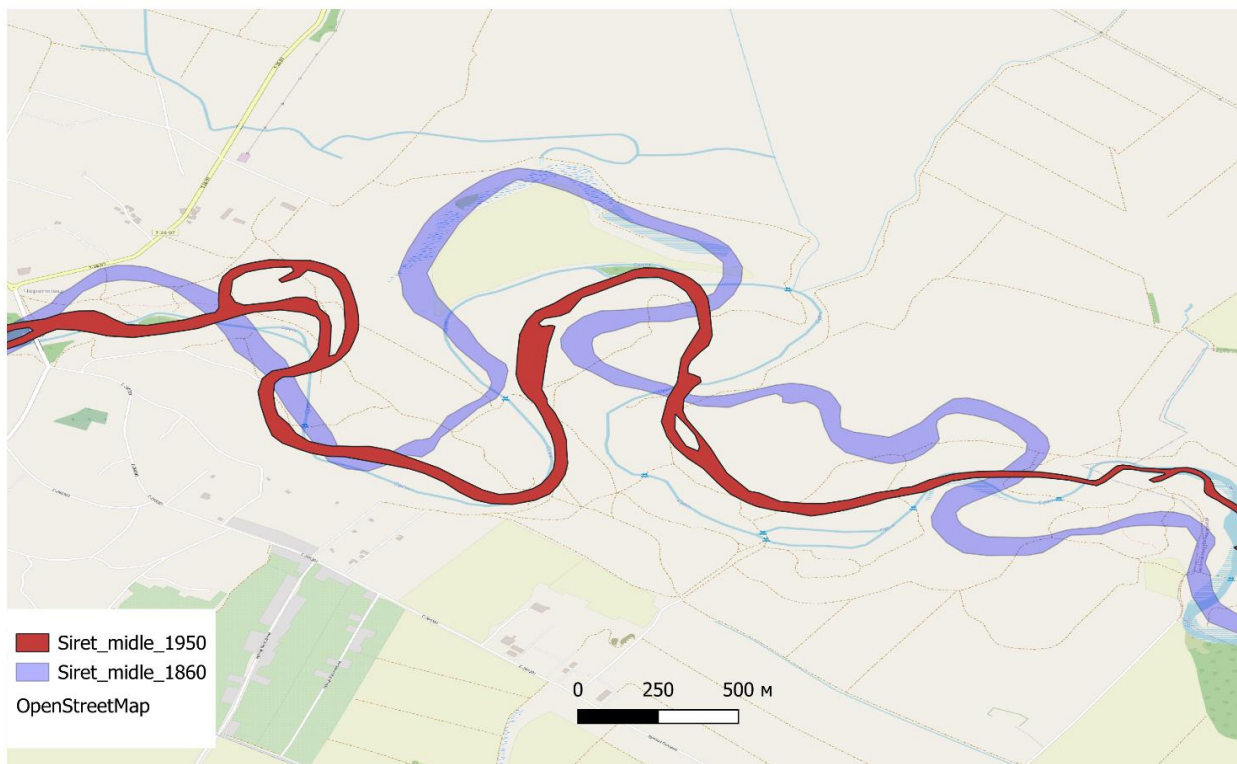


Рис.3.3. Векторизовані русла річки Сірет в QGIS 3.34 за 1860 та 1950 роки.

Після цього створіть новий полігональний векторний шар для векторизації русел. У QGIS це робиться через меню Шар → Створити шар → Створити новий Shapefile. Вкажіть тип геометрії «Полігон» і виберіть ту ж систему координат, що й для растрових даних - WGS 84 (EPSG: 4326). Відкрийте новий шар для редагування та почніть обводити межі русел річок, використовуючи інструменти малювання полігонів.

Наступним було виконано оцифрування русла річки Сірет за 1860-ті та 1950-ті роки.

Свідченням того, що процедура привязки та зміни координатної системи відбулась правельно свідчить накладі обведені русла середини 1860-х років на стариці з OpenStreetMap (див рис. 3.3.). Як бачимо виявлені відхилення виявилися незначними, що підтверджує високу якість виконаної роботи.

3.2. Напрацювання методики використання космознімків місії Landsat за 1984-2024 роки з допомогою EO Browser.

Нові горизонти відкриваються для дослідницьких річкових систем. Зображення космосу дозволяють отримувати інформацію про високу точність про стан водних об'єктів, динаміку ліжок, а також вивчати антропогенні та природні фактори, що впливають на гідрологічні процеси. Одним із найзручніших та найпотужніших інструментів для роботи з супутниковими даними є браузер EO, який поєднує доступність, широкий вибір джерел даних та сучасний інтерфейс для аналізу.

Дослідження ділянки річки Сірет (від гирла річки Малі Сірет до державного кордону України та Румунії) вимагає даних, які не тільки вивчають сучасний стан території, але й проаналізують її динаміку для останнього кілька десятиліть. Браузер EO був ідеальним вибором для цього завдання, отримавши доступ до даних різних супутникових місій, включаючи серію Landsat (4-5, 8-9), який охоплює період з 1980-х до сьогодення. Це дозволяє порівнювати зміни на території протягом декількох десятиліть і проводити просторовий аналіз з високою точністю.

Зручність EO Browser - це також функції пошуку та фільтрації, які дозволяють вибрати дані за часовими рамками, атмосферною кореляцією та географічним розташуванням. Ці критерії дозволяють отримати якісні супутникові зображення для подальшої роботи. Крім того, платформа забезпечує доступ до даних обробки рівня L2, які вже включають корекцію атмосфери, що збільшує точність аналізу гідрологічних та ландшафтних характеристик.

Ще одна перевага EO Browser - це можливість завантажувати знімки з високою роздільною здатністю. Це важливо для вивчення динаміки річкових процесів та змін ландшафту, оскільки детальні дані дозволяють проаналізувати навіть найменші зміни. Використовуючи даний браузер, нам вдалося завантажити якісні багатоканальні зображення місій Landsat 4-5 та Landsat 8-9 у ключові 1984, 1994, 2004, 2014 та 2024 роки, вибираючи дати з найкращими умовами корекції атмосфери. За низької хмарності отримані фото Землі дають можливість детально оцінювати не тільки поверхню, а й можливість подальшого опрацювання космознімків у ГІС продуктах, таких як QGIS та ARCGIS.

Тому для проведення досліджень ділянки річки Сірет (від гирла річки Малі Сірета до державного кордону України та Румунії) проводили пошук та завантаження багатоканальних знімків з використанням даної платформи.

Отож, наш алгоритм проведення досліджень космознімків розпочинається з відкриття самого браузера в якому ми будемо проводити скачування космознімків за наступним посиланням - <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>. Щоб вибрати необхідні космознімки на платформі EO Browser, спочатку потрібно увійти у свій обліковий запис або створити новий, якщо ще немає такого. Після цього необхідно ввести, у вікні пошуку що знаходиться вверху праворуч на панелі, координати або назву бажаної території, наприклад, "село Петричанка", "гирло невеликої річки Сірет" або "річка Сірет" (як у нашому випадку). Також можна використовувати інструмент виділення області дослідження. Даний

інструмент знаходиться на панелі праворуч і має вигляд п'ятикутника.

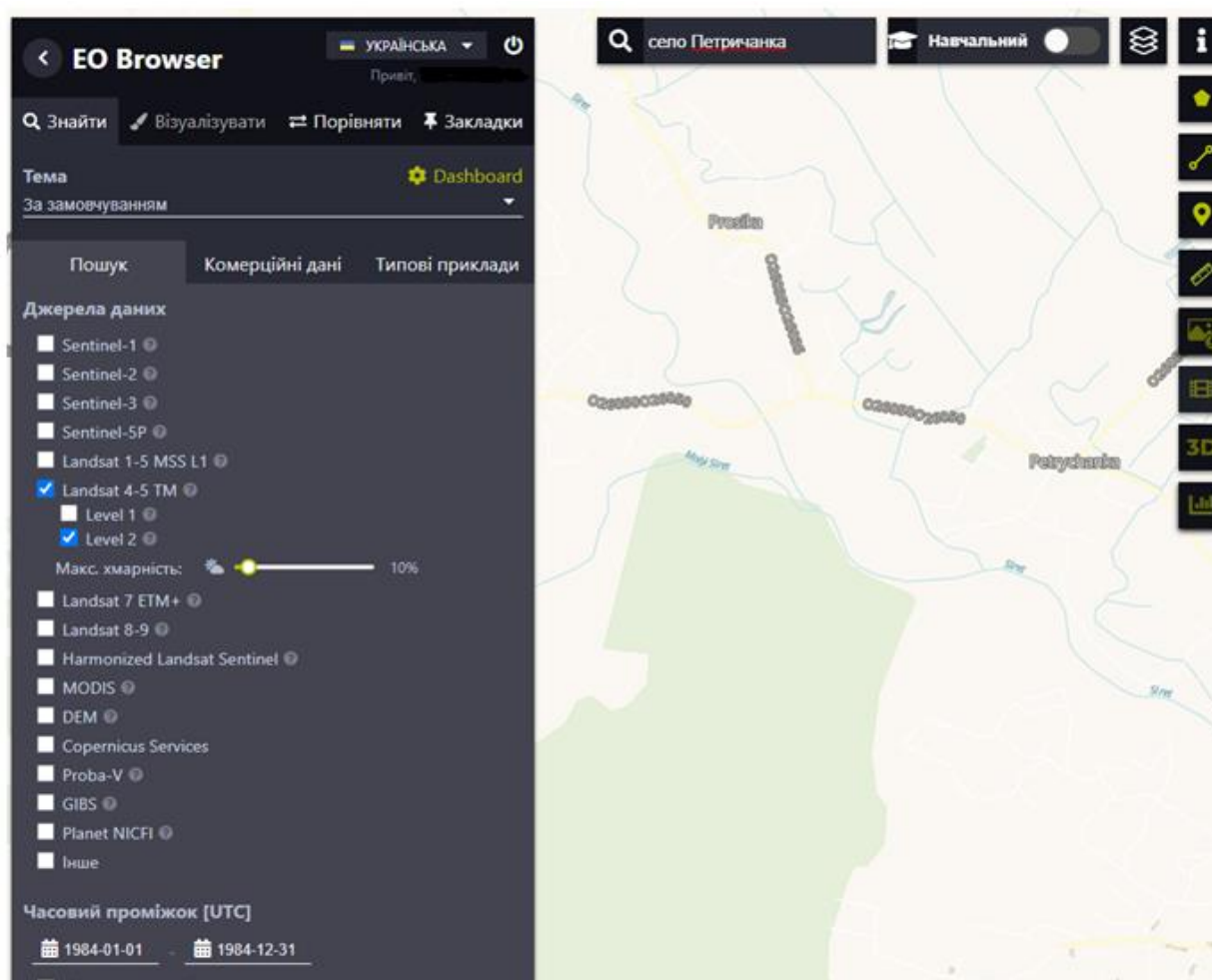


Рис. 3.4. Вибір території дослідження та часової шкали в EO Browser

Тільки після того нашим наступним кроком буде обрання місії. Для аналізу змін русла річки Сірет за 1984 рік нами було обрано Landsat 4-5 TM L2, яка забезпечує доступ до супутникових зображень за даний період. Обов'язково переконайтеся, що дані L2 встановлюються, оскільки ці дані вже включають атмосферну корекцію, яку ми ставимо на позначці 10%. Потім, у шкалі часу, встановлюємо часовий інтервал, який охоплює весь 1984 рік з 1 січня по 31 грудня. Це дозволяє здійснити пошук добре візуалізованих космознімків за даний період.

Далі оглянувши результати пошуку, оцінюємо якість кожного знімка, звертаючи увагу на покриття області інтересу, відсутність спотворень та відсутність густого покриву хмар. Зі списку доступних знімків за 1984 рік нами було обрано той, який найкраще відповідає вимогам дослідження, тобто з

мінімальною хмарністю та повним покриттям ділянки річки Сірет (Рис. 3.4. та 3.5)

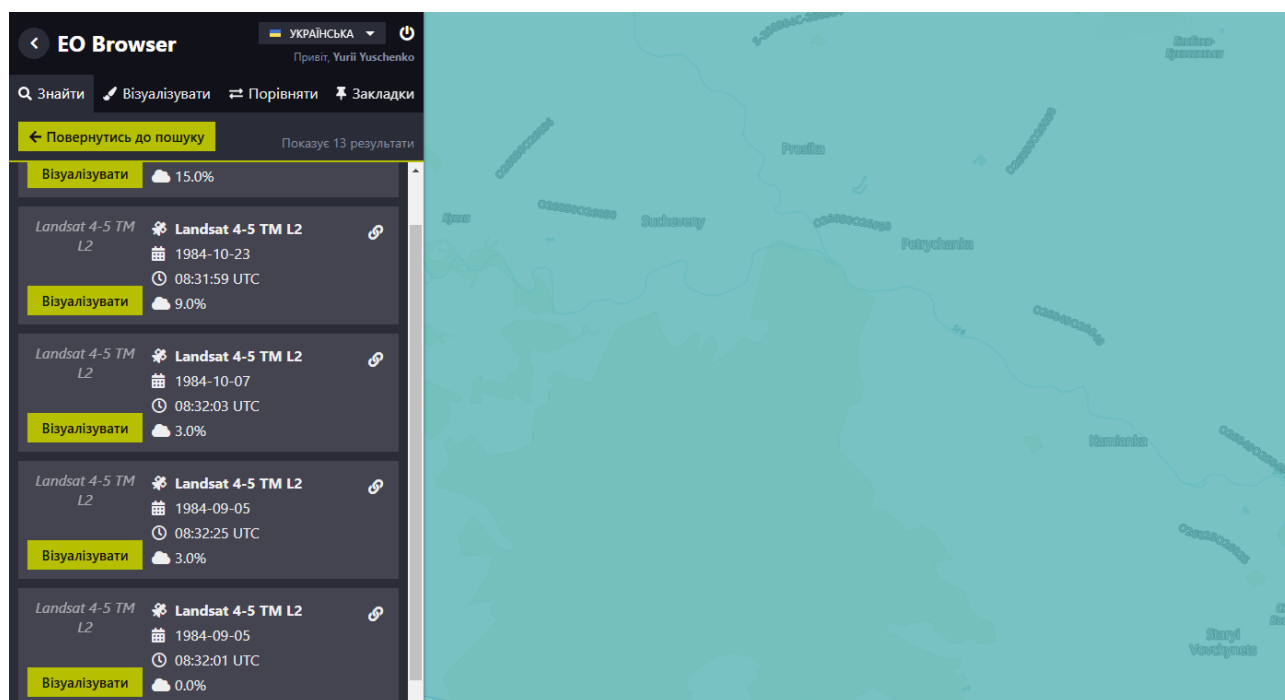


Рис. 3.5. Процес вибору та візуалізації необхідних космознімків в EO Browser.

Після вибору відповідного знімка перейдіть до завантаження, обравши опцію «Завантажити». Важливо вказати формат даних, наприклад, «High», для збереження у хорошій якості. Завантажити необхідно всі бенди за вказану дату, тобто від B1 до B7. Нарешті, переконуємось що завантажений файл на комп'ютері, відповідає необхідній якості зображення для опрацювання у подальшому нашому дослідженні. Такий підхід дозволяє отримати якісний супутниковий знімок 1984 року, придатний для подальшого аналізу ділянки річки Сірет (див. Рис. 3.7.).

За таким самим принципом ми скачуємо спектральні фото за різні роки. Нами було обрано інтервал в 10 років. Отож, було завантажено космознімки Landsat 4-5 за 05.09.1984, 19.10.1994 та 12.09.2004, а також Landsat 8-9 за 08.09.2014 та 21.10.2024.

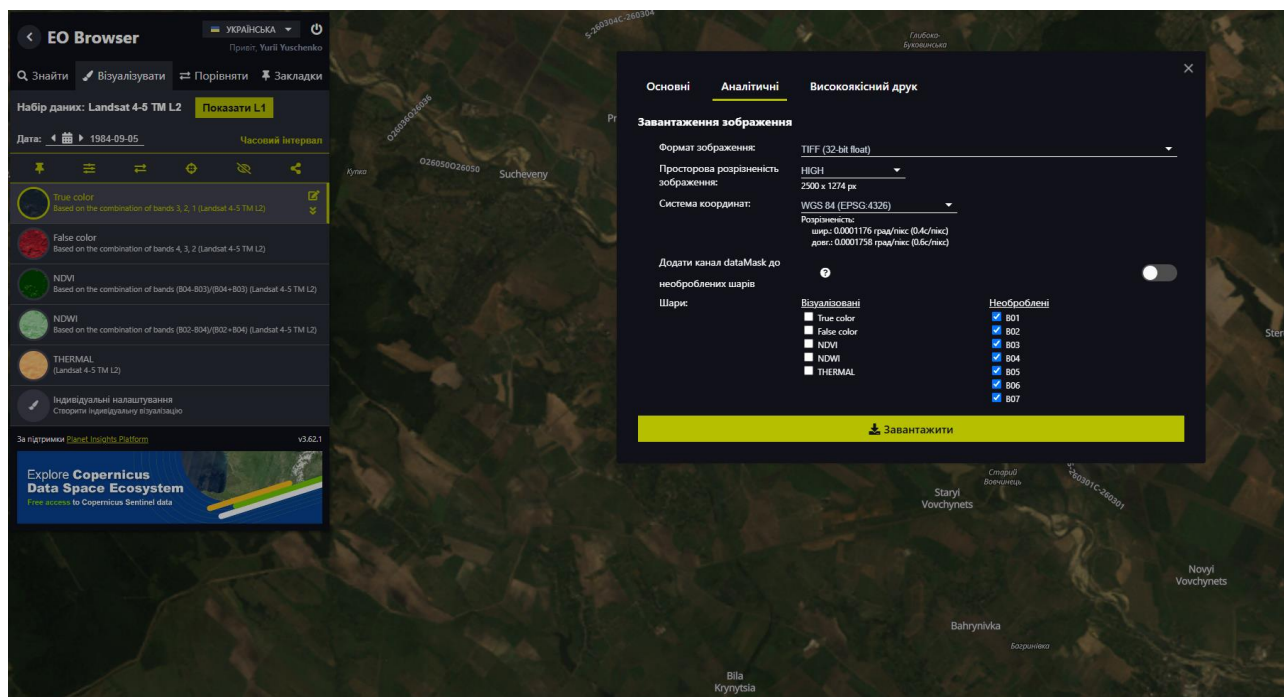


Рис. 3.6. Процедура завантаження спектральних каналів Landsat 4-5 з EO Brouser за 5 вересня 1984 року

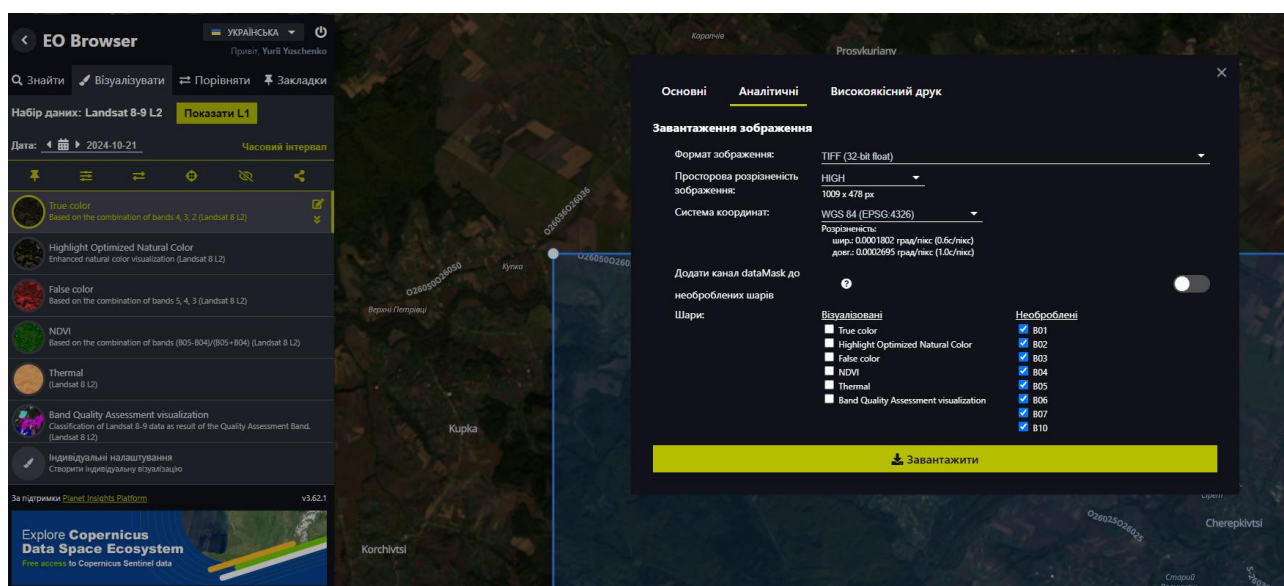


Рис. 3.7. Процедура завантаження спектральних каналів Landsat 8-9 з EO Brouser за 21 жовтня 2024 року

Цей методичний підхід забезпечив отримання якісних і релевантних даних для дослідження динаміки річки Сирет за різні часові періоди.

3.3. Напрацювання методики ідентифікації річки Сірет використовуючи QGIS 3.34.

Для опрацювання вивантажених космознімків для нашого об'єкту дослідження, а саме річки Сірет в межах сіл Петричанка -Новий Вовчинець нам в першу чергу необхідно створити новий проект в програмі QGIS 3.34. Дана версія програмного продукту QGIS є останньою стабільною версією і буде використовуватись нами в нашому дослідженні.

Першими ми будемо опрацьовувати космознімки за 1984 рік, як такі що є першими в нашому хронологічному списку даних дистанційного зондування Землі. Для обробки космознімків Landsat 4-5 у QGIS, з метою визначення індексу NDWI, нам спочатку необхідно створити новий проект. Отож відкриваємо програму QGIS, переходять у меню «Проект» та натискаємо «Новий», після чого зберігають його, задаючи назву та місце збереження. Наступним етапом визначають систему координат: у правому нижньому куті вибирають поле координат, обирають відповідну систему (найчастіше EPSG:4326 для України) та підтверджують вибір.

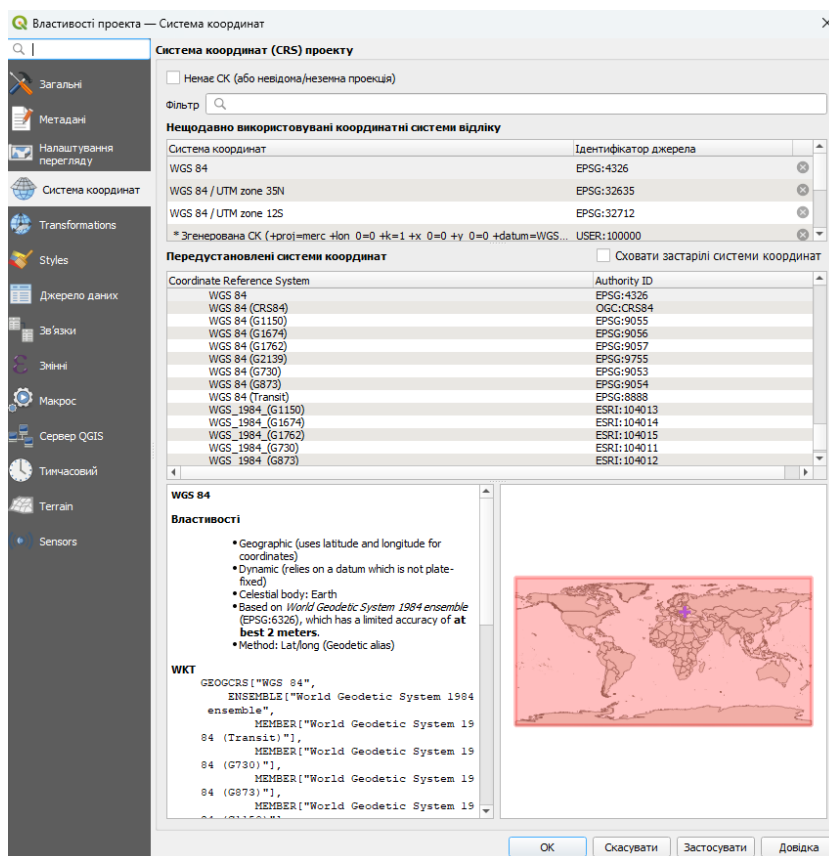


Рис. 3.8. Вибір координатної системи для нового проекту в QGIS 3.34

Наступним кроком нашої є додавання бендів, каналних космознімків Landsat 4-5 у QGIS. Дану процедуру можна виконати наступним шляхом: відкриваємо меню «Шар» та оберіть опцію «Додати шар», а потім «Додати растровий шар». У вікні, що з'явиться, ставимо відмітку на «Файл» та натискаємо «...», щоб обрати файл і завантажити необхідні бенди. Ми обирали всі : B1, B2, B3, B4, B5, B6 та B7 по черзі.

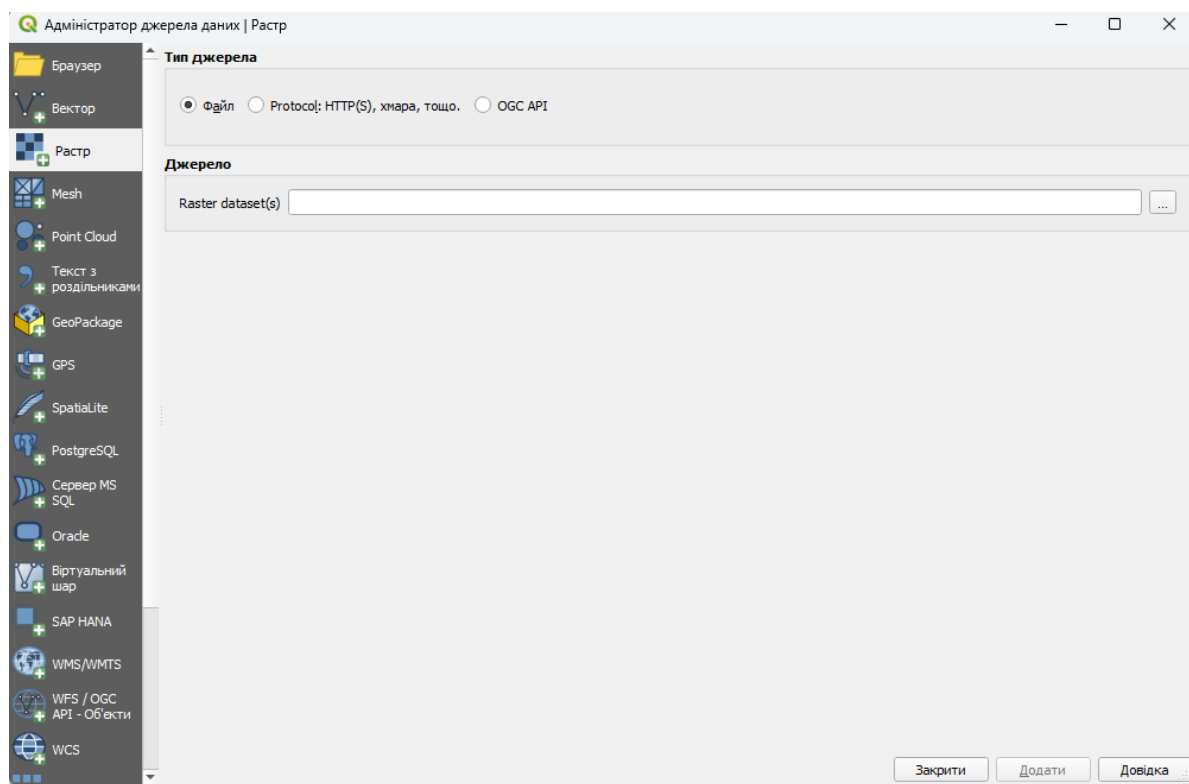


Рис. 3.9. Процедура вибору координатної системи для проєкту

Кожен із цих бендів є окремим GeoTIFF файлом, що представляє спектральний канал. Після вибору всіх файлів натискаємо «Додати», щоб додати шари до проєкту. Завантажені шари з'являться у списку шарів з відповідними назвами бендів. Для об'єднання бендів у єдиний файл переходимо до меню «Растр» та обираємо опцію «Різне», а потім функцію «Об'єднати». У вікні об'єднання растрових файлів виділіть усі бенди, які слід об'єднати, вкажіть ім'я вихідного файлу, наприклад, «landsat_composite.tif», та натисніть «Запустити» (див. рис.3.10.). У результаті з'явиться один об'єднаний файл, що міститиме всі спектральні канали як єдиний растровий шар. Наступним кроком є розрахунок NDWI. Для цього перейдіть до меню «Растр» і виберіть «Калькулятор растрів». У вікні калькулятора оберіть об'єднаний шар, створений на попередньому кроці.

У полі для введення формули розрахунку введіть вираз для NDWI: $(B2 - B4) / (B2 + B4)$, де B2 — це зелений канал, а B4 — ближній інфрачервоний. Вказуємо ім'я файлу латиницею, наприклад, «NDWI_1984.tif», і обираємо місце для збереження (див. рис.3.11.). Після того як ми натиснемо «Запустити», щоб обчислити індекс NDWI, файл що утвориться файл буде доданий до проєкту, і його можна налаштувати для візуалізації, використовуючи стиль із відповідним розтягом значень, щоб виділити водні об'єкти. Це дозволяє ефективно працювати з космознімками для аналізу водних об'єктів.

Варто зазначити що у растровому калькуляторі необхідно вписувати безпосередньо назву файлу що знаходиться у переліку. Для зручності знаки можна обирати безпосередньо з калькулятора а щоб не вписувати назви файлів потрібно двічі натиснути на файл який необхідно додати у калькулятор. Згідно назв наших файлів формула для розрахунку NDWI, буде розраховуватись за наступною формулою:

$$\frac{(1984-09-05-00_00_1984-09-05-23_59_Landsat_4-5_TM_L2_B02_ (Raw)@1'' - 1984-09-05-00_00_1984-09-05-23_59_Landsat_4-5_TM_L2_B04_ (Raw)@1')}{1984-09-05-00_00_1984-09-05-23_59_Landsat_4-5_TM_L2_B02_ (Raw)@1'' + 1984-09-05-00_00_1984-09-05-23_59_Landsat_4-5_TM_L2_B04_ (Raw)@1')}$$

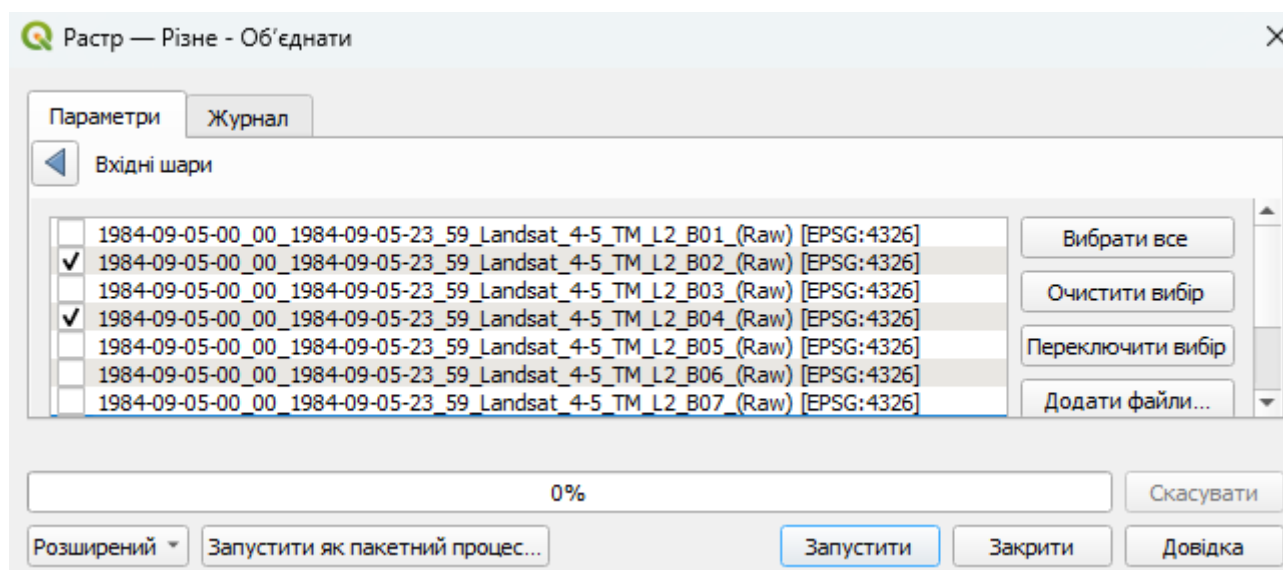
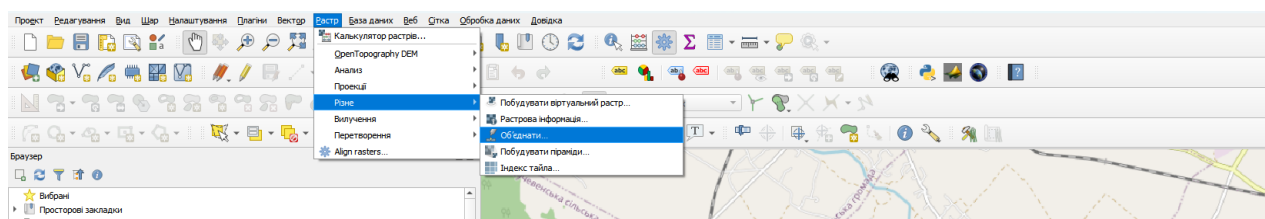


Рис. 3.10. Наведення покрокової процедури об'єднання шарів для подальшого розрахунку індексу NDWI

Дана формула була сформована безпосередньо з назв шарів які задіяні у розрахунку.

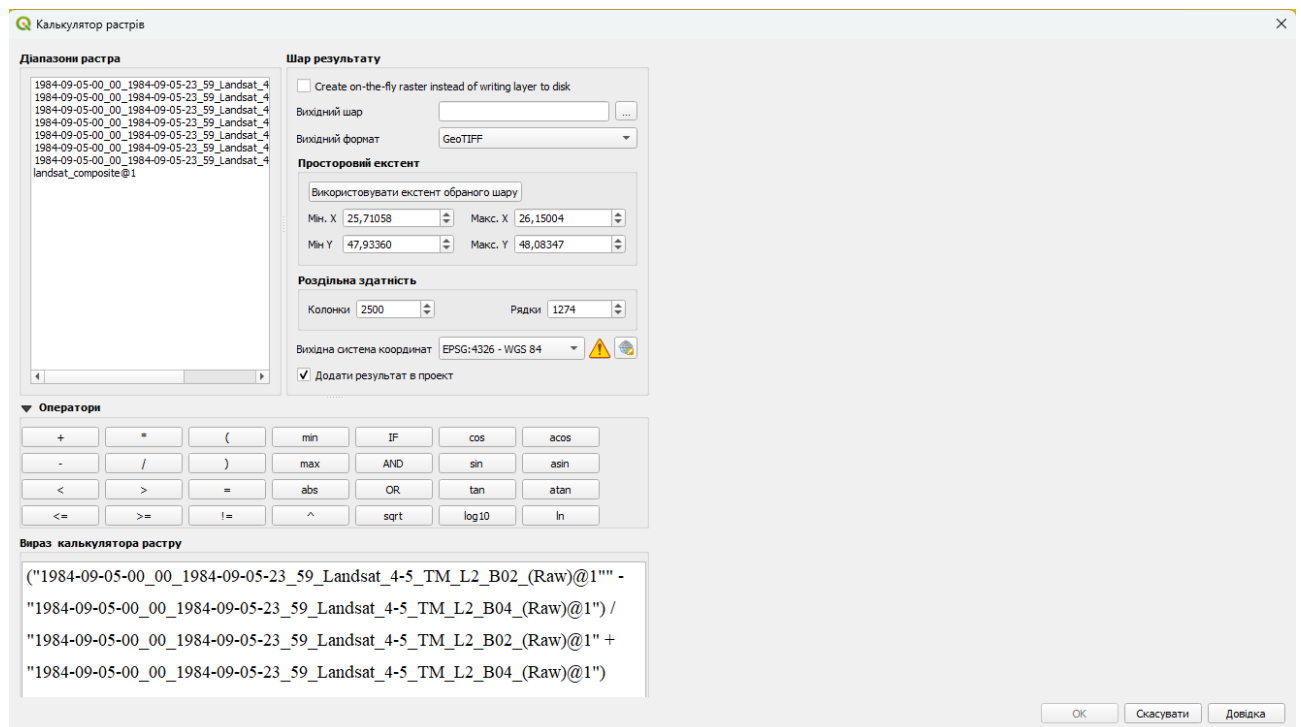


Рис. 3.11. Задавання формули в растровому калькуляторі для розрахунку індексу NDWI.



Рис. 3.12. Демонстрація утвореного шару NDWI за 05.09.1984

Після обчислення шару NDWI, який продемонстровано на рисунку 3.12, необхідно проробити процедуру грубого обведення русла річки Сірет - від гирла річки Малий Сірет до державного кордону між Україною та Румунією. Для цього

використовується процес обведення русла з допомогою тимчасового скетч-шару. Для створення тимчасового шару потрібно на панелі інструментів обрати відповідний інструмент який вказано на рисунку 3.13.

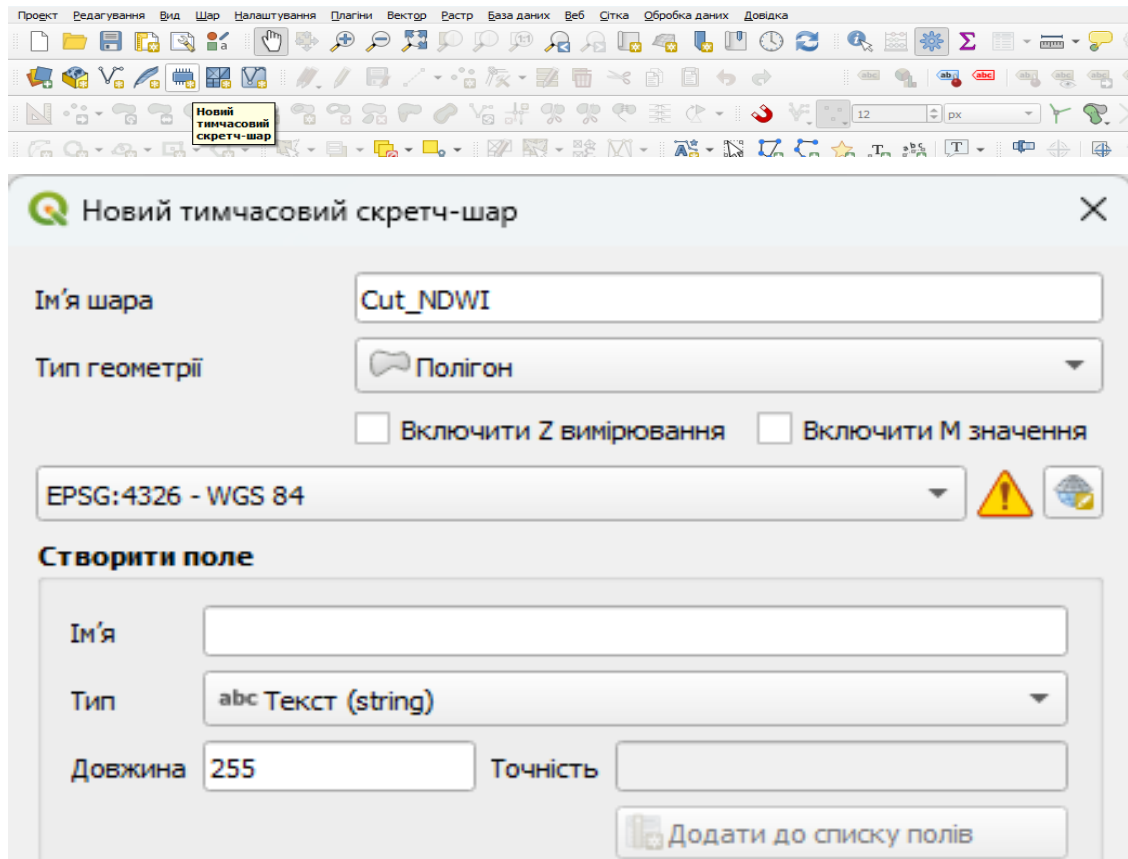


Рис. 3.13. Процес створення скетч-шару для обведення ділянки річки Сірет

Інший шлях для створення скетч-шару це шлях обирання з панелі Меню пункту «Шар» → «Створити шар» → «Створити тимчасовий робочий шар». Далі у вікні що відкриється виберіть тип геометрії «Полігон» для подальшого обведення території. Новий тимчасовий шар з'явиться у списку шарів. Активуємо його для редагування, натиснувши кнопку «Почати редагування» у панелі інструментів (інструмент виглядає як жовтий олівець).

Після цього використовуємо інструмент «Малювання полігонів», щоб обвести межі русла річки на основі шару NDWI. У процесі обведення керуємось значеннями NDWI, які відповідають водним об'єктам (зазвичай позитивні значення, кольори світло сірий та білий), та грубо окреслюємо контур русла. Після завершення обведення натискаємо «Завершити редагування» та збережіть зміни у тимчасовому шарі.

Для вирізання русла річки зі шару NDWI переходимо до меню "Растр" → «Вилучення» → «Вирізати растр за шаром маски». У вікні, що з'явиться, виберіть шар NDWI_1984 як вхідний растровий шар, а створений скетч-шар «Cut_NDWI» як шар маски за контурами якого буде здійснюватися вирізання растру. Вказуємо ім'я вихідного шару (наприклад, "River_Cut.tif") та місце збереження. Натисніть "Запустити", щоб вирізати русло річки.

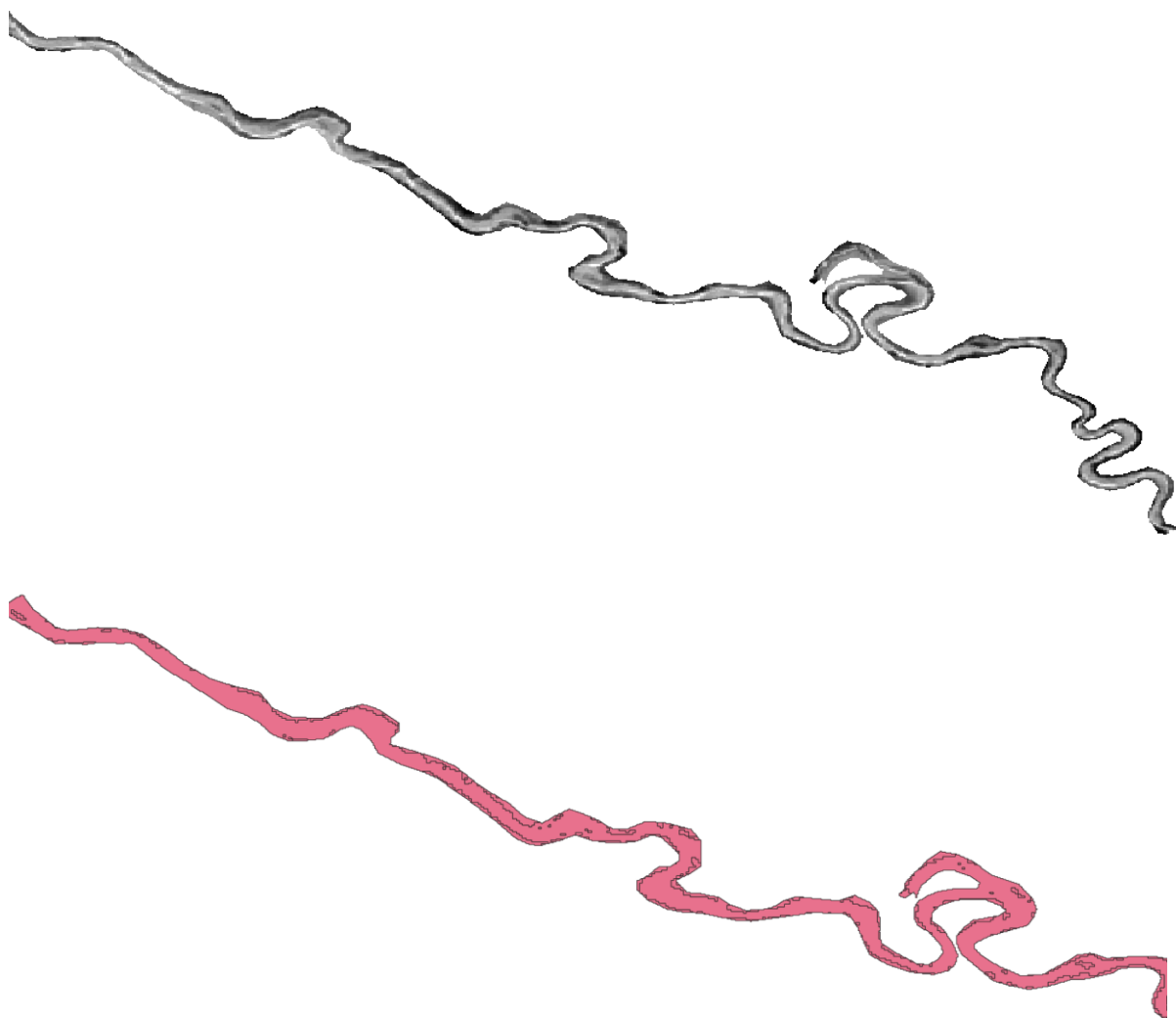


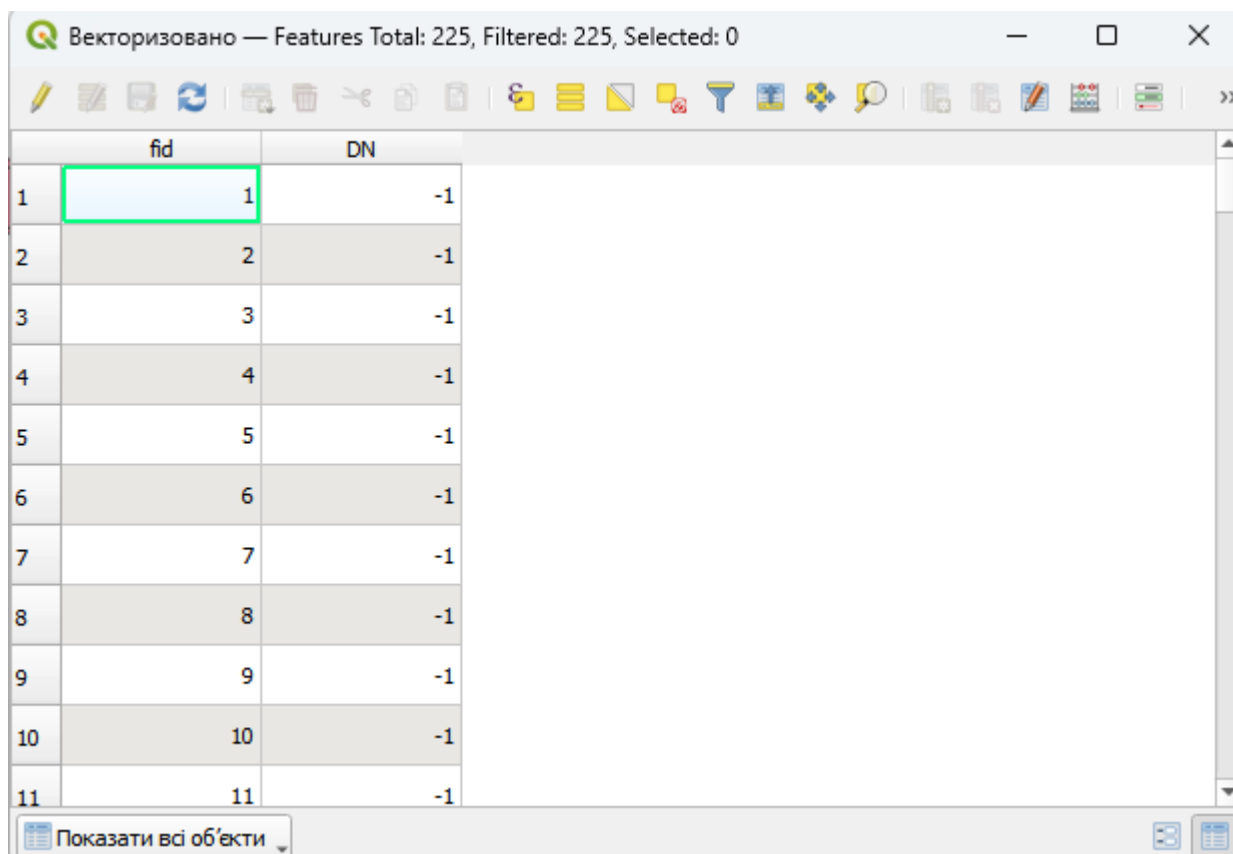
Рис. 3.14. Зображення вирізаного растрового шару (зверху) та векторизованого вирізаного шару ділянки річки Сірет за 1984 рік

Після створення вирізаного шару потрібно здійснити процедуру перетворити його на векторний шар. У меню «Растр» оберіть «Перетворення» → «Полігонізувати (растр у вектор)». У вікні виберіть вирізаний шар NDWI як вхідний. Укажіть ім'я вихідного файлу «Siret_1984.shp» та місце збереження. Натискуємо «Запустити», щоб перетворити растровий шар на векторний.

Результуючий векторний шар буде містити полігональні геометрії, які відповідають виділеному руслу річки (див. рис. 3.14).

Для подальшого опрацювання векторного шару, створеного з вирізаного шару NDWI, потрібно видалити полігони, які не відповідають водним зонам. Це досягається шляхом аналізу атрибутивної таблиці та фільтрації об'єктів, які не відповідають потрібним умовам.

Відкриваємо атрибутивну таблицю шару натиснувши правою кнопкою на створеному векторизованому шарі «Siret_1984.shp». і обираємо «Відкрити таблицю атрибутів». У таблиці знаходимо стовпець, який містить значення DN (Digital Number), що ідентифікують тип поверхні. Наприклад, значення NDWI, де позитивні значення вказують на воду, а негативні « $DN \leq 0$ » необхідно видалити.



	fid	DN
1	1	-1
2	2	-1
3	3	-1
4	4	-1
5	5	-1
6	6	-1
7	7	-1
8	8	-1
9	9	-1
10	10	-1
11	11	-1

Показати всі об'єкти

Рис. 3.115. Виділення у векторному полігональному шарі зон які не відповідають водним об'єктам.

Необхідно вибрати пункт меню даного вікна , що допомагає нам шляхом написання формули « $DN = -1$ » провести виділення всіх об'єктів що мають негативне значення у даному шейпфайлі.

Це відфільтрує лише ті полігони, які відповідають водним зонам. Натискаємо «Вибрати об'єкти», і видаляємо все що було активовано даним фільтром. Тепер в таблиці відображатимуться лише об'єкти, які відповідають водному об'єкту. Це дозволяє проводити подальший аналіз.

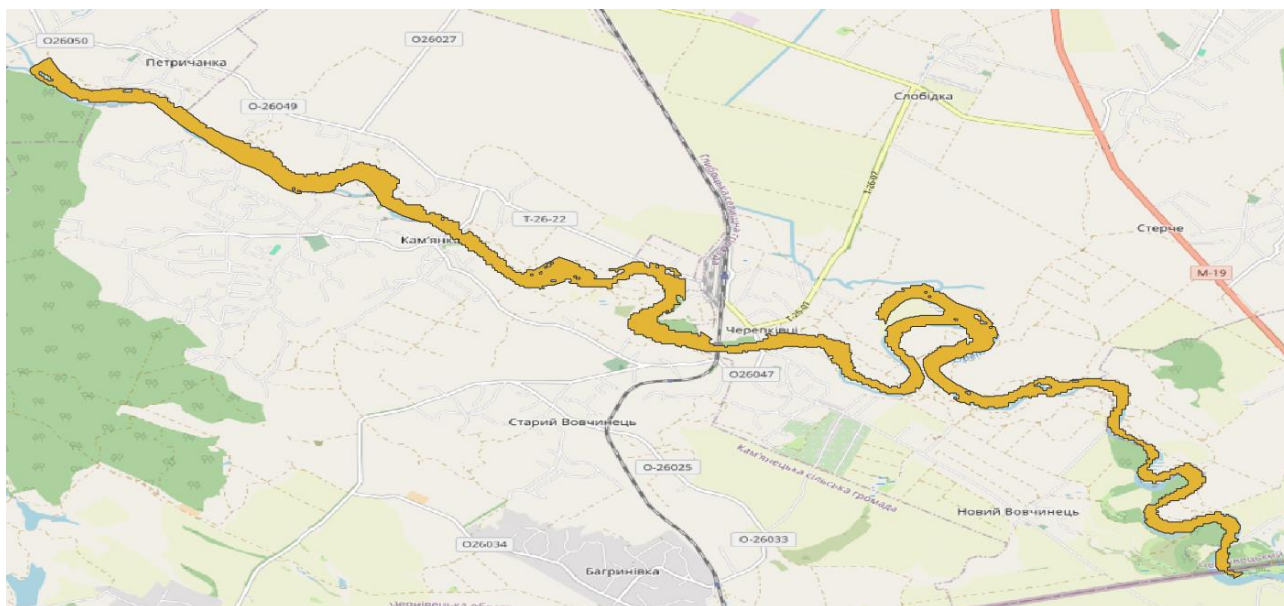


Рис. 3.16. Вигляд векторизованого русла річки Сірет за 1984 рік створений за даними космознімків місії Landsat 4-5 2L автоматичним шляхом.

Варто зазначити що растровий шар, який відображає водну поверхню річки Сірет, є досить широким що може бути пояснене тим, що розміри пікселів місії Landsat 4-5 мали розміри 30 *30 метрів.

Аналогічну процедуру ідентифікації водного тіла річки Сірет було здійснено з періодичністю в 10 років аж до 2024 року. Отож як результат ми отримали 5 опрацьованих шейпфайлів які ідентифікували водне тіло об'єкту дослідження.

Особливість виділення індексу NDWI полягає в тому, що для місії Landsat 8-9 L2 використовуються бенди B3 та B5 і саме вони підставляються у формулу растрового калькулятора для космознімків за 2014 та 2024 роки. Нижче наводимо формулу розрахунку:

$$NDWI = \frac{B3 - B5}{B3 + B5}$$

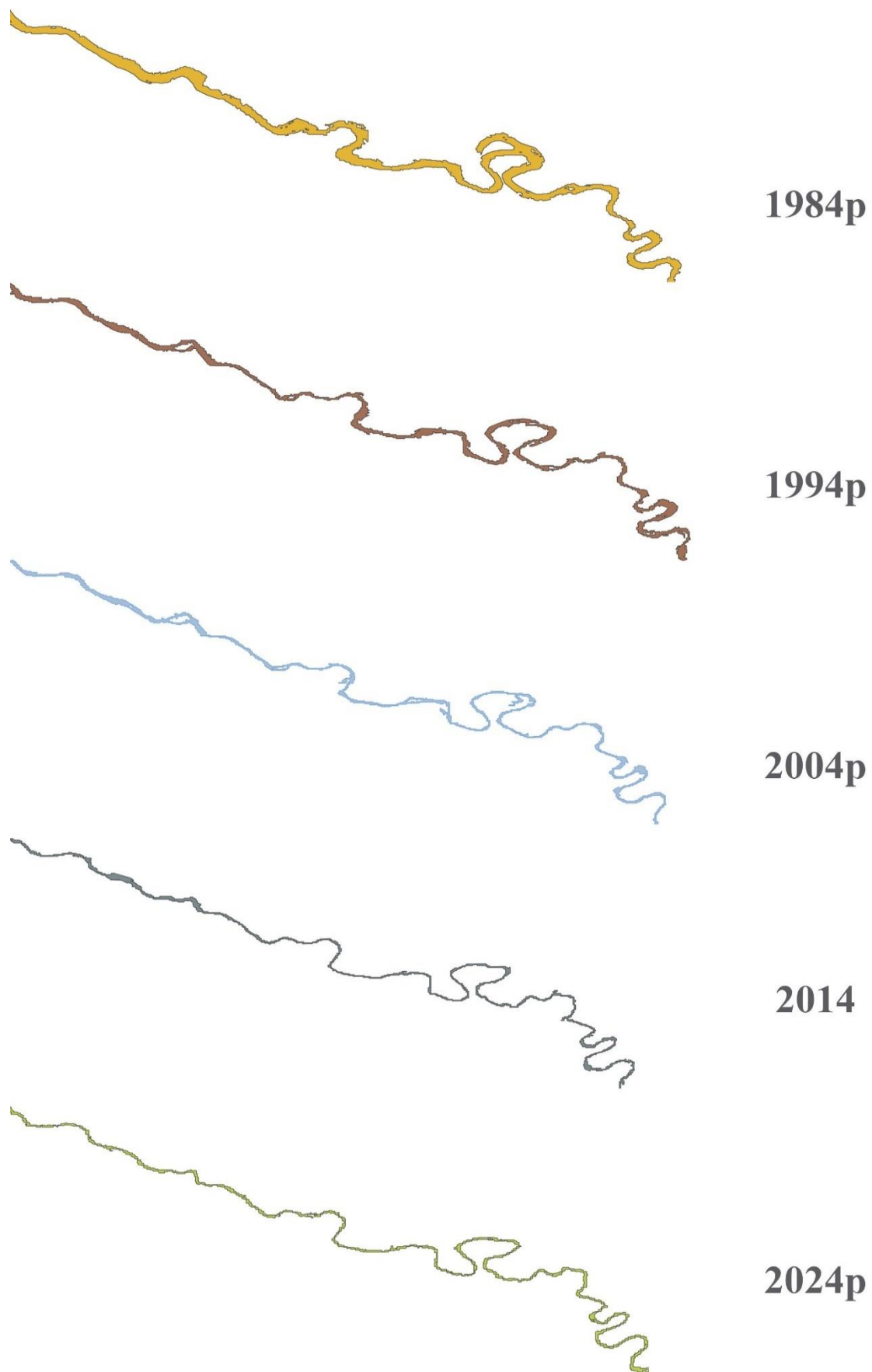
Результати даного дослідження продемонстровані на наступних рисунках 3.17. та 3.18

Як можна побачити з рисунків 3.17 - 3.19 товщина автоматично векторизованих русел значно відрізняється. Так, наглядно видно на знімку 3.19, що товщина русла за 1984 рік найбільша, за 1994 рік – векторизоване русло стало тоншим, а за 2004 і до 2024 їх товщина майже не змінюється. Оскільки всі космознімки опрацьовувались з допомогою QGIS 3.34, і відповідно застосовувався один алгоритм розрахунку – програмне забезпечення не може бути причиною такої зміни. Причина того, що автоматично виділене русло річки з космознімків Landsat 4- 5 за 1984 рік має найгрубіші обриси, а знімки за наступні роки показують поступове зменшення товщини ліній, пов'язана з кількома можливими факторами:

1. Роздільна здатність та технічні характеристики сенсорів:

- Landsat 4-5 (1984,1994): Ці місії оснащені сенсорами Thematic Mapper (TM), які мали просторову роздільну здатність 30 метрів. Проте технології того часу мали обмежену радіометричну роздільну здатність (8 біт), меншу чутливість та вищий рівень шуму. Це призводило до менш точного відображення дрібних деталей, таких як контури річок, і, відповідно, до грубіших та товстіших обрисів при автоматичному виділенні русла за допомогою NDWI [36].

- Краща деталізація знімків Landsat 4-5 за 2004 рік пояснюється не зміною сенсорів, а покращенням методів обробки даних, можливим комбінуванням часових серій знімків, сприятливими умовами зйомки та удосконаленнями алгоритмів радіометричної та атмосферної корекції. Також ретроспективна обробка архівних даних могла значно підвищити їхню якість для сучасного використання. Дані Landsat піддаються повторній обробці після їхнього первинного збору.



**Рис. 3.17 Візуальне представлення всіх векторних шарів річки Сірет
отриманих за рахунок обробки космознімків місії Landsat за період з 1984
по 2024 роки**

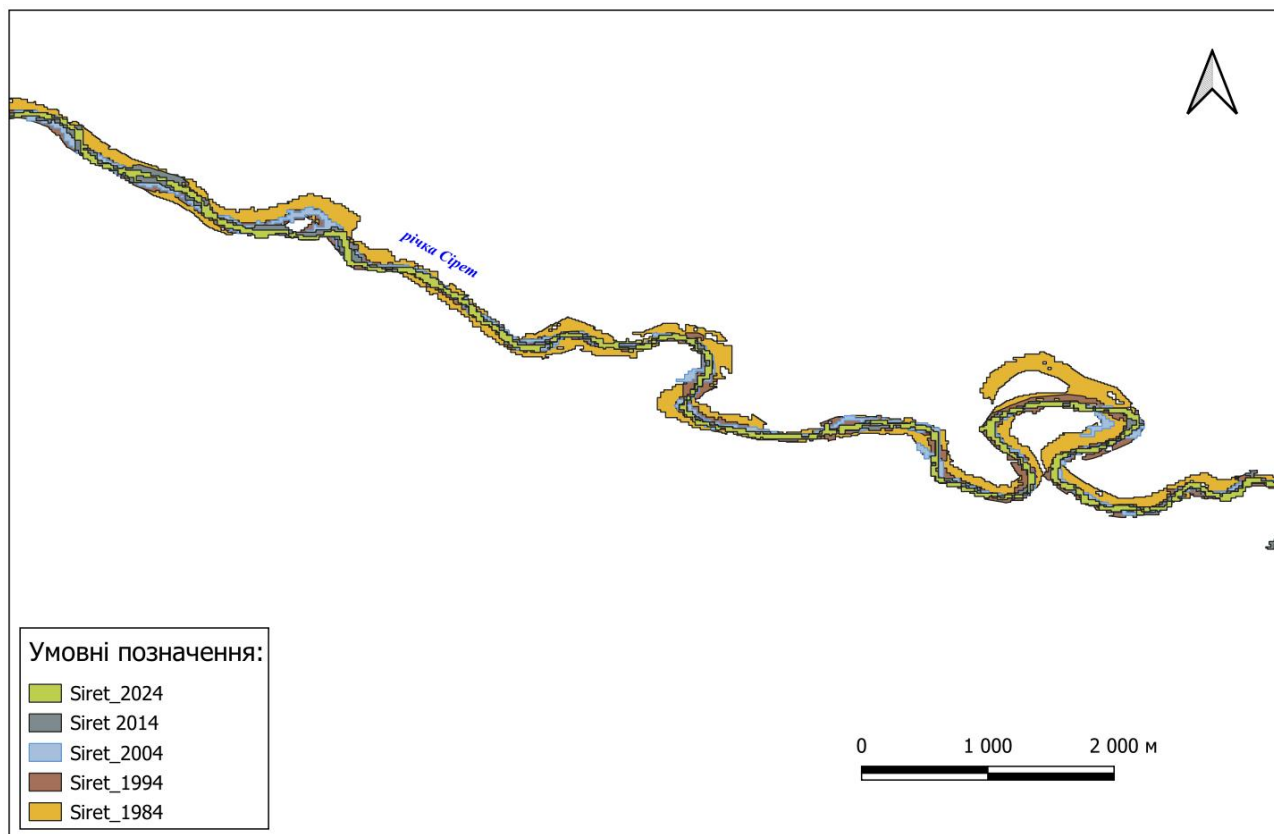


Рис. 4.18. Картосхема накладених русел річки Сірет за період з 1984 по 2024 роки з інтервалом 10 років

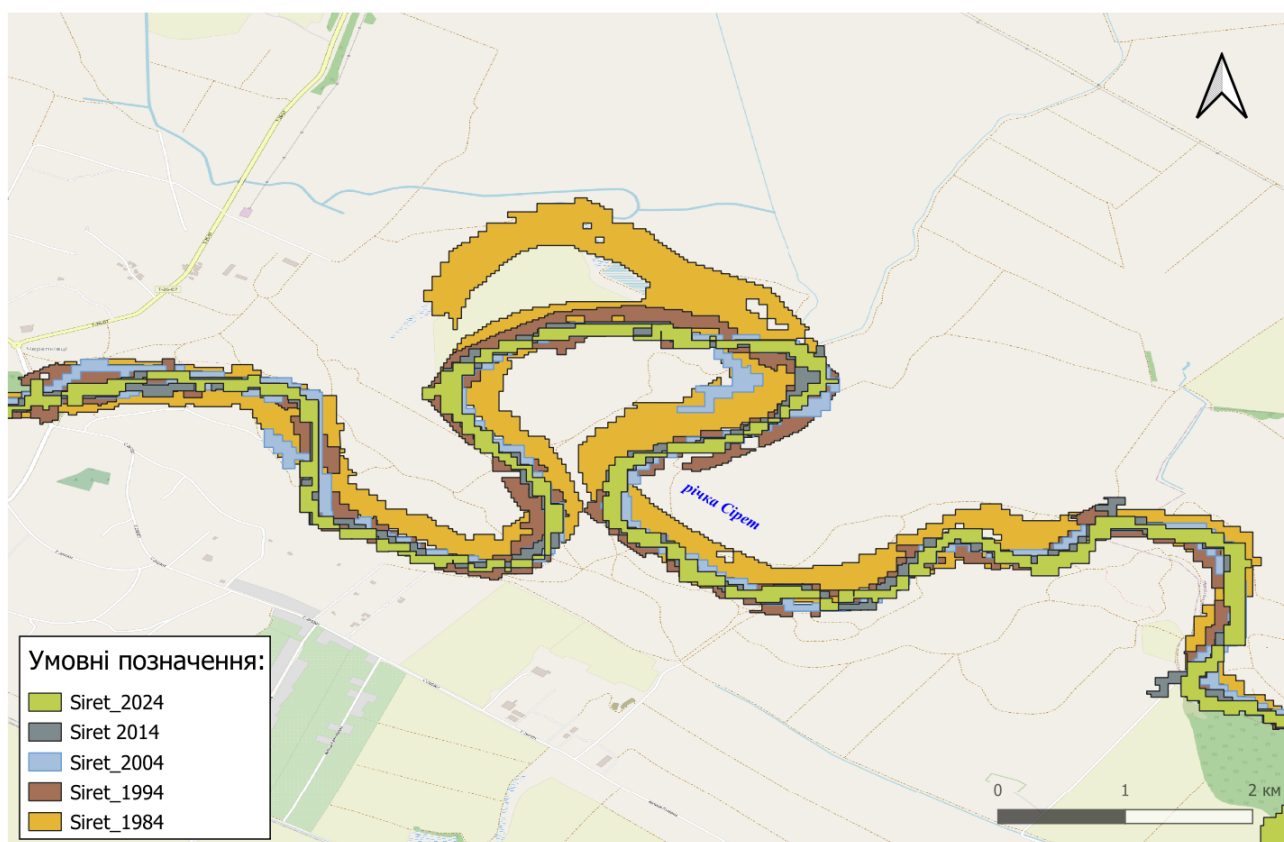


Рис. 3.19. Картосхема накладених русел річки Сірет в прикордонній ділянці за період з 1984 по 2024 роки з інтервалом 10 років (масштаб 1:10000)

Цей процес, відомий як ретроспективна обробка, включає застосування сучасних методів для покращення якості старих знімків. Зокрема, це стосується стандартизації геометричної та радіометричної корекції, використання вдосконалених моделей відбивної здатності поверхні та фільтрації шуму. Такі підходи дозволяють зменшити артефакти та підвищити якість зображень. Ці процеси детально описані в документації USGS щодо Landsat Collections, де зазначено, що колекції забезпечують відому якість даних для всіх продуктів рівня Landsat [33].

- Landsat 8-9 (2013, 2021): Оснащені сенсором Operational Land Imager (OLI), ці місії мають покращену радіометричну роздільну здатність (12 біт), вищу чутливість та краще співвідношення сигнал/шум. Це дозволяє більш точно визначати межі водних об'єктів, що призводить до тонших та чіткіших обрисів русла на знімках за 2014 та 2024 роки. Новіші сенсори мають покращені спектральні канали з більш вузькими та точними діапазонами. Це підвищує точність розрахунку NDWI, оскільки забезпечує кращу диференціацію між водою та іншими поверхнями[26, 30].

2. Якість зображень та вплив атмосфери:

- Старіші знімки можуть мати більше атмосферних спотворень, хмарності та інших артефактів. Недосконалість атмосферної корекції у минулому могла призводити до менш чітких результатів при розрахунку NDWI [35].

4. Радіометрична та геометрична корекція:

- Протягом часу методи радіометричної та геометричної корекції удосконалювалися. Новіші знімки проходять більш точну корекцію, що підвищує якість даних та точність визначення меж водних об'єктів.

5. Зміни в методах обробки даних:

Програмне забезпечення, таке як QGIS, також сприяло покращенню точності аналізу. Інструменти для роботи з растровими даними дозволяють виділяти межі водних об'єктів із більшою деталізацією завдяки використанню сучасних алгоритмів та можливості роботи з високоточними форматами, наприклад, float32 [28].

6. Параметри порогових значень при обробці NDWI:

Різні порогові значення, застосовані до знімків різних років, можуть призводити до варіацій у товщині виділеного русла. Якщо для старіших знімків застосовувалися вищі пороги через нижчу якість даних, це могло призводити до грубіших обрисів.

Різниця у товщині автоматично виділених русел річок на знімках Landsat різних років зумовлена розвитком технологій дистанційного зондування, вдосконаленням сенсорів супутників та прогресом у методах обробки геоданих. Старіші знімки, отримані за допомогою Landsat 4-5, відображають менш точні межі водних об'єктів через обмежену роздільну здатність сенсорів, вищий рівень шуму та менш розвинені методи атмосферної корекції. З появою Landsat 8-9 точність знімків значно зросла завдяки покращеній радіометричній роздільній здатності, оптимізованим спектральним каналам і сучасним технологіям корекції даних. Додатково, використання програмного забезпечення, такого як QGIS, дозволяє ефективно виділяти водні об'єкти за індексом NDWI із високою деталізацією, що забезпечує точність і достовірність результатів. Ці вдосконалення мають критичне значення для аналізу динаміки водних об'єктів та управління водними ресурсами.

3.4. Відпрацювання методики виділення багаторічної смуги руслоформування та рекомендації щодо її використання

Для автоматичного виділення багаторічної смуги руслоформування (БСР) річки Сірету в межах однорідних ділянок русла і заплави (ОДРЗ) використовується методика, що поєднує аналіз історичних карт, супутникових знімків та інструментів геоінформаційних систем. Процес спрямований на ідентифікацію територій, де русло річки мігрувало протягом багатьох десятиліть з 1860-х років і до 2024 року, враховуючи природні й антропогенні чинники, що впливали на формування річкового ландшафту. Ця методика є ключовою для гідроморфологічного моніторингу і планування сталого розвитку долини річки.

Для реалізації підходу спочатку проводиться аналіз і підготовка базових даних. В якості основи використовуються карти русел річки, обведені на картах 1860-х і 1950-х років. Ці карти прив'язані до сучасної системи координат, що забезпечує точність геопросторових розрахунків. Додатково, автоматично визначені русла річки за допомогою індексу NDWI (Normalized Difference Water Index) для 1984, 1994, 2004, 2014 та 2024 років на основі супутникових знімків місії Landsat 4-5 та Landsat 8-9 (що було детально описано в попередньому пункті 4.3.). NDWI дозволяє виділити водні об'єкти на основі спектральних характеристик, що є ефективним інструментом для аналізу динаміки русла.

Для наведених шарів даних усі карти й результати аналізу супутникових знімків переводяться до єдиної системи координат (WGS 84) і інтегруються в середовище QGIS 3.34. На цьому етапі важливо зазначити що нами були отриманий, з бази даних кафедри географії України та регіоналістики шейпфайл, що ідентифікував бічні межі однорідних ділянок русла і заплави (ОДРЗ) річки Сірет. Даний шейпфайл був інтегрований в проект з та перепроеційований в WGS 84 (EPSG: 4326) в QGIS. Межі ОДРЗ є основою для проведення подальшого аналізу, оскільки вони враховують геоморфологічні особливості території та забезпечують контекст для дослідження динаміки русла.

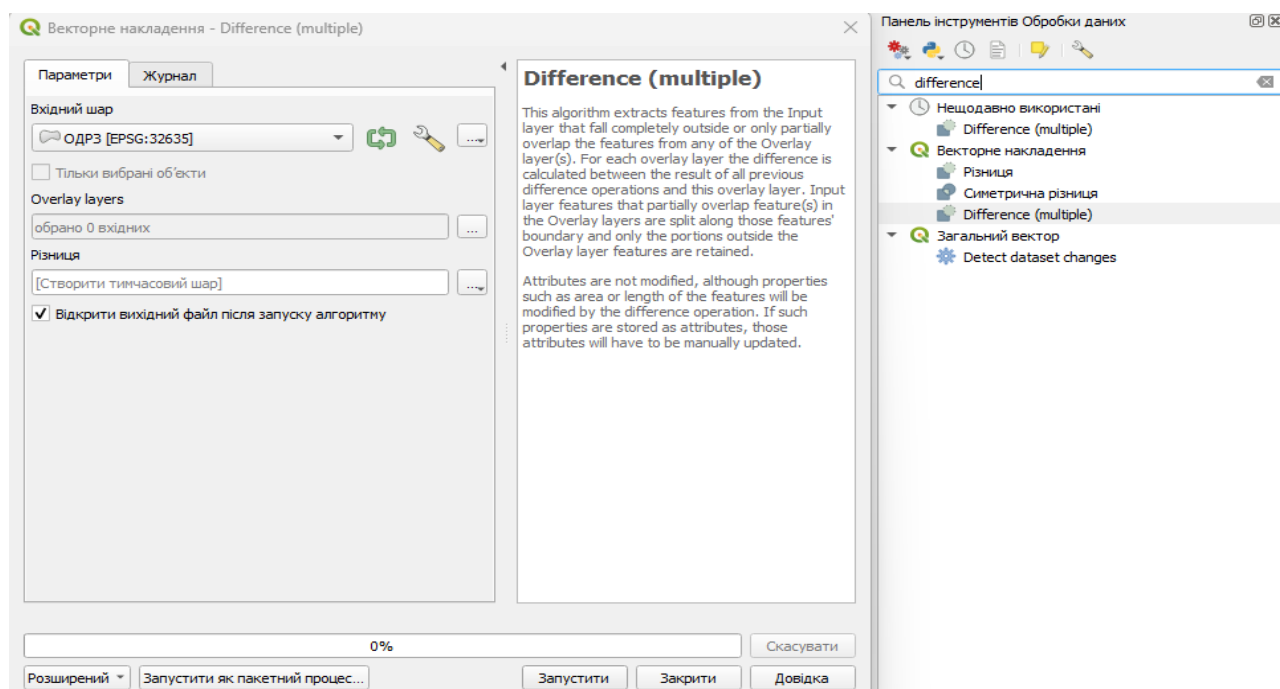


Рис. 3.20. Застосування плагіна «Difference – multiple» для визначення БСР р. Сірет

Для виділення багаторічної смуги руслоформування застосовується плагін «Difference – multiple» у QGIS []. Цей інструмент дозволяє автоматично визначити ділянки перетину й відмінності між векторними шарами, що представляють різні етапи розвитку русла. Основою для аналізу є об'єднання шарів русел різних періодів, починаючи з історичних карт і завершуючи сучасними даними NDWI. Плагін обчислює зони, які залишаються стабільними, тобто в результаті аналізу надається візуальна інформація про території, де русло річки зберігалось без змін, та ділянки, які були під впливом процесів руслоформування. Смуги міграції русла визначаються як зона, де відбувалися найбільші зміни, та описують її ширину, довжину й геометричні особливості. Для цього результати роботи плагіна накладаються на межі ОДРЗ, що дозволяє оцінити вплив міграції русла на прилеглі території.

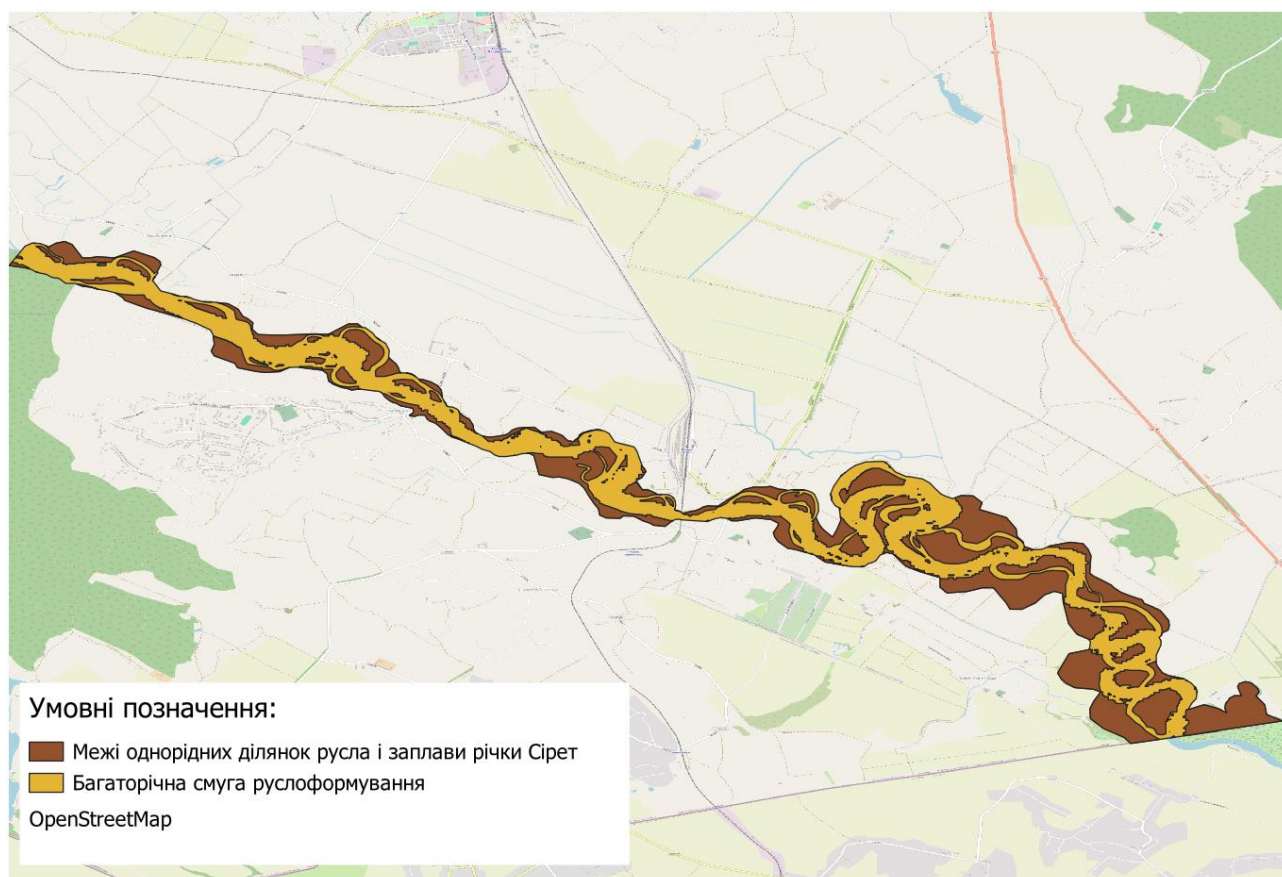


Рис. 3.21. Картосхема автоматично ідентифікованої багаторічної смуги руслоформування від 1860-х до сьогодення з допомогою плагіна «Difference – multiple» для р. Сірет

Важливою частиною процесу є коригування отриманих меж БСР. Автоматично виділені межі аналізуються та уточнюються вручну з урахуванням локальних особливостей рельєфу й гідрології.

Автоматична методика виділення багаторічної смуги руслоформування з допомогою плагіну «Difference – multiple» забезпечує точність і надійність результатів. Після завершення роботи дані про БСР інтегруються у базу даних ОДРЗ та можуть використовуватись для аналізу руслових процесів. Такий підхід дозволяє не лише картографувати зони міграції русла, а й оцінити вплив антропогенних і природних чинників на стабільність руслових процесів. Це відкриває нові можливості для управління річковими ландшафтами й розробки адаптивних стратегій сталого розвитку долини річки.



Рис. 3.22. Картосхема автоматично ідентифікованої багаторічної смуги руслоформування від 1984 до 2024 року з допомогою плагіна «Difference – multiple» для р. Сірет

Порівняння багаторічної смуги руслоформування (БСР) та положення русел від 1860-х років до сьогодення (див. рис. 3.21, 3.24) з БСР 2000-х років (рис. 3.23) показує значні зміни у динаміці русла річки Сірет. Зокрема, деякі сегменти русла демонструють ознаки стабілізації, що особливо помітно в районах із

впливом гідротехнічних споруд або урбанізованих територій (наприклад, у межах села Карапчів та Черепківці). Ці стабільні ділянки можуть свідчити про суттєве обмеження природного руху русла через антропогенні чинники, які впливають на формування річкового ландшафту.

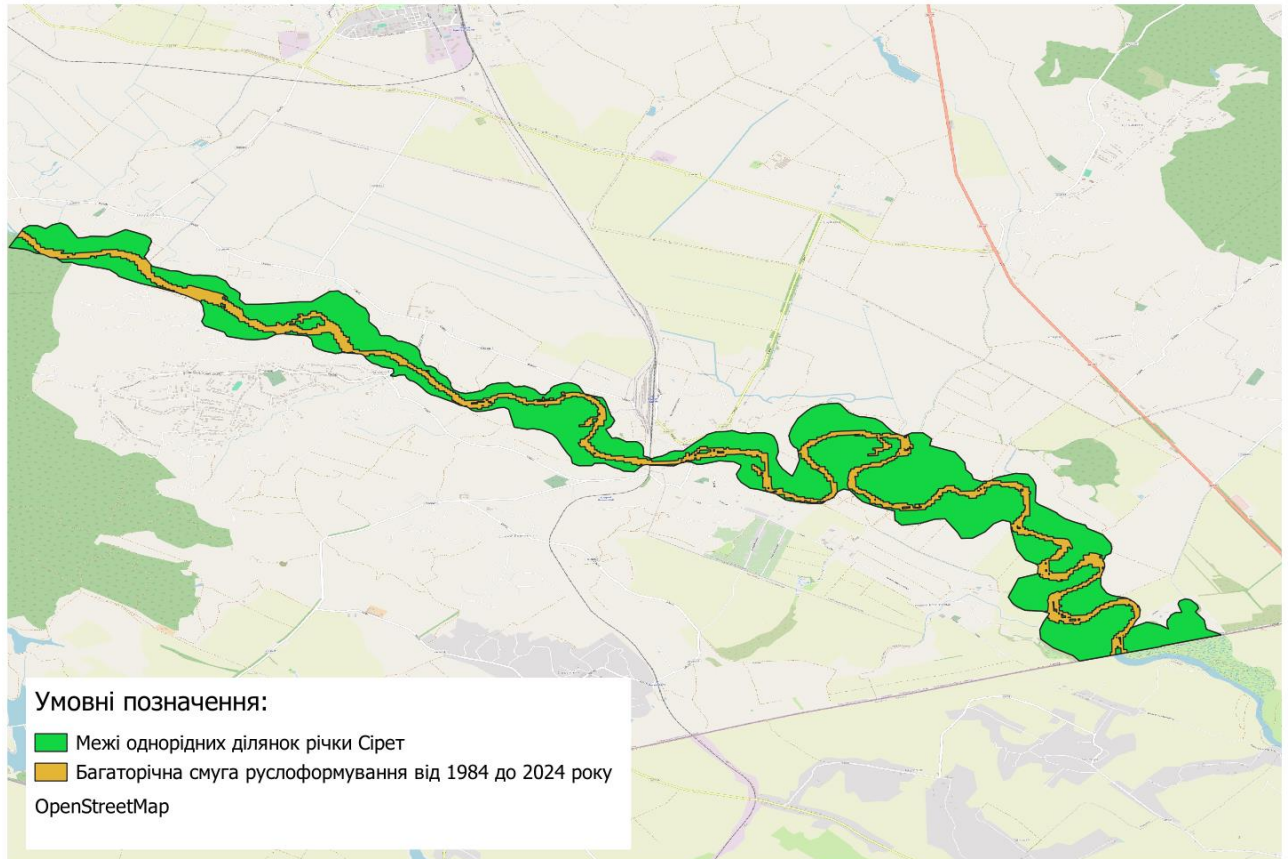


Рис. 3.23. Картосхема автоматично ідентифікованої багаторічної смуги руслоформування від 2004 до 2024 року з допомогою плагіна «Difference – multiple» для р. Сірет

Водночас, аналіз порівняння БСР за рисунками 3.21 та 3.22 вказує на відмирання звивин і спрямлення русла на окремих ділянках протягом більше ніж 100 років (нижче села Петричанка). Такі зміни характерні для річок, які зазнали впливу природних та антропогенних процесів, таких як регуляційні роботи, зміна землекористування у прибережній зоні та природна гідродинаміка.

У 2000-х роках багаторічна смуга руслоформування річки Сірет демонструє тенденцію до звуження та меншої строкатості в порівнянні з попередніми періодами. Ці зміни можуть бути зумовлені двома основними факторами: покращенням якості та деталізації супутникових знімків, що

дозволило точніше ідентифікувати межі руслових структур, а також поступовою стабілізацією руслових процесів на певних ділянках.

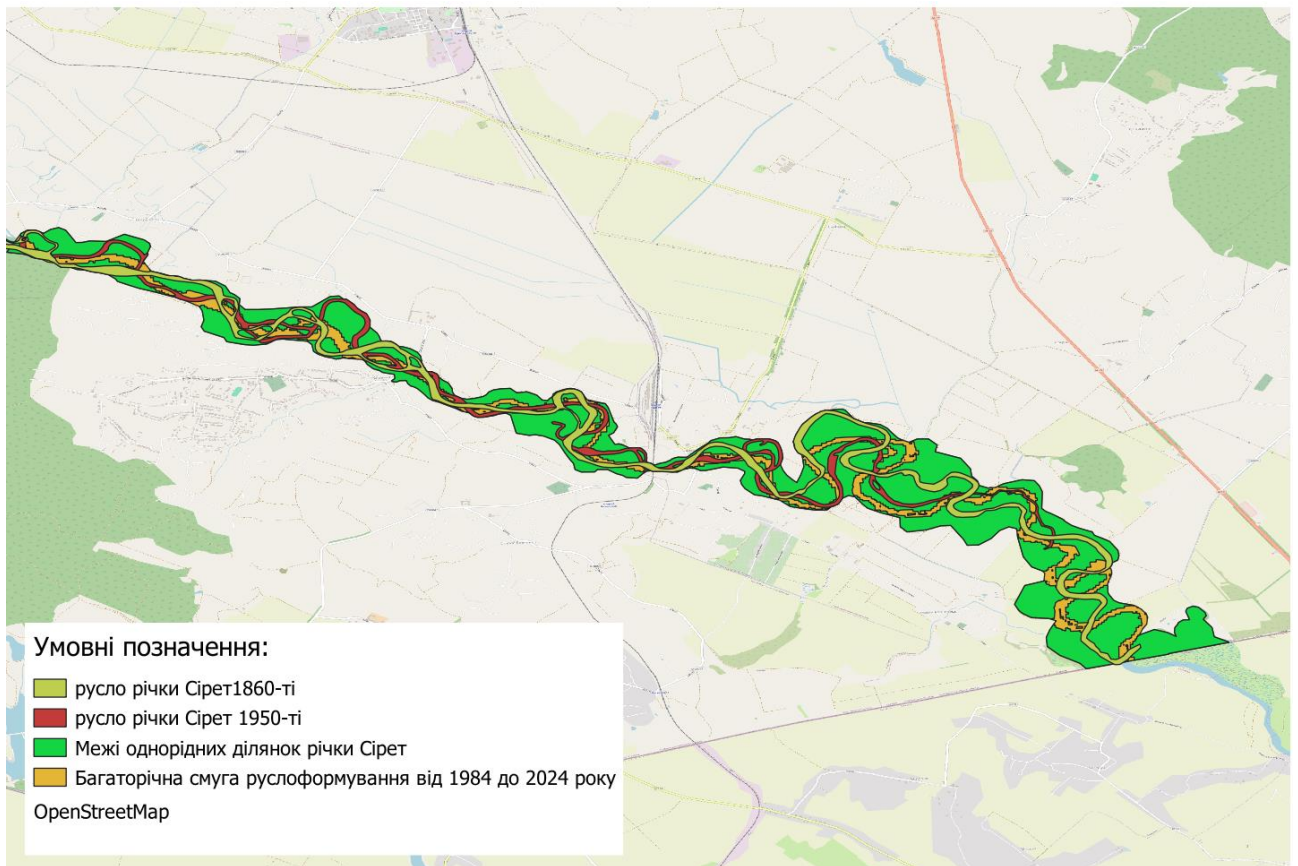


Рис. 3.24. Картосхема порівняння багаторічної смуги руслоформування 2000-х років і з руслом 1860-тих та 1950-х років на фоні меж ОДРЗ річки Сірет.

Стабілізація планових деформацій русла річки Сірет за період 2004–2024 років, як видно на рисунку 3.23, чітко простежується у порівнянні з попередніми періодами. Попри значні паводки 2008 і 2010 років, які могли суттєво вплинути на геометрію русла, русло демонструє відносну стабільність. Це може бути наслідком зменшення природної динамічності руслових процесів або ж результатом ефективного впровадження антропогенних заходів, таких як регуляція русла чи укріплення берегів.

Аналіз рисунків 3.23 та 3.24 дозволяє зробити висновок, що у періоди середини XIX і XX століть руслові процеси відбувалися в значно ширшому коридорі, що свідчить про більшу динаміку міграцій русла. У сучасний період спостерігається звуження багаторічної смуги руслоформування, що також може бути ознакою стабілізації русла річки.

Аналіз положень русел та БСР показує, що зменшення інтенсивності змін русла та стабільність БСР у сучасний період є тенденцією, яка потребує подальшого дослідження. Це важливо для прогнозування майбутніх змін у руслі та розробки стратегій сталого управління водними ресурсами.

Таким чином, аналіз БСР за останні два десятиліття демонструє цікаву, що свідчить про природну чи керовану рівновагу.

Висновки:

1. Проведено комплексний аналіз природних умов та гідрологічних характеристик басейну річки Сірет у межах української частини. Встановлено, що басейн характеризується значною різноманітністю рельєфу, включаючи гірські, височинні та долинні рівні, які визначають специфіку руслоформувальних процесів. Аналіз кліматичних умов засвідчив вплив помірно-континентального клімату з достатнім зволоженням, що створює умови для нерівномірного розподілу річкового стоку за сезонами. Виявлено, що більша частина стоку припадає на весняний і літній періоди, що пов'язано з таненням снігу та дощовими паводками. Особливістю басейну є складна гідрологічна структура, де більшість приток є малими річками, які формують тісні взаємозв'язки з головним руслом. Водночас встановлено значний антропогенний вплив на водні ресурси, що виявляється у використанні води для сільського господарства та господарсько-питних потреб. Отримані результати розкривають природно-антропогенні чинники, які впливають на гідрологічні процеси, і підкреслюють важливість інтеграції історичних та сучасних даних для моніторингу й управління водними ресурсами.

2. Під час дослідження зібрано та оброблено великий обсяг вихідних даних, які включають історичні карти (1860-х і 1950-х років) та супутникові знімки місії Landsat 4-5 та 8-9 за період 1984–2024 років. Історичні карти дозволили зафіксувати природні умови руслоформування і руслових структур на ранніх етапах антропогенного впливу, тоді як супутникові знімки надали змогу деталізувати сучасні динамічні процеси з високою роздільною здатністю. Завдяки систематизації даних вдалося створити комплексну базу для подальшого картографування та аналізу змін у межах прикордонної частини басейну річки Сірет. Процес включав збір, обробку, верифікацію та інтеграцію цих даних у сучасні геоінформаційні системи, що значно спростило роботу з великими масивами інформації.

3. У ході роботи створено методику, що охоплює всі етапи створення карт: від геоприв'язки історичних карт і супутникових знімків до ідентифікації

водних об'єктів за допомогою цифрових індексів. Основним елементом методики є застосування NDWI (Normalized Difference Water Index), що дозволяє ефективно виділяти водні об'єкти навіть у складних географічних умовах. Методика також включає побудову векторних моделей і багатошарових карт, які забезпечують наочність та точність просторово-часового аналізу. Завдяки покроковому підходу ця методика може бути адаптована для дослідження інших річкових басейнів. Застосування індексу NDWI для обробки супутникових знімків Landsat підтвердило свою ефективність у виділенні водних об'єктів. Це дозволило автоматизувати ідентифікацію русел і зменшити вплив людського фактору на обробку даних. Методика виявилася особливо корисною для аналізу ділянок зі складною гідрологічною структурою, що дозволяє чітко виділяти русла річок навіть у періоди низького водопілля.

4. Геоприв'язка історичних карт і супутникових знімків до єдиної системи координат (WGS 84) дозволила інтегрувати різні набори даних у сучасні ГІС-системи. Особливістю підходу є детальне використання контрольних точок для мінімізації похибок під час трансформації зображень. Удосконалення цього методу забезпечило точність географічної прив'язки даних, що є критично важливим для вивчення змін у межах басейну річки Сірет.

5. Побудовано багатошарові цифрові моделі, які дозволяють простежити просторово-часові зміни руслових форм у басейні річки Сірет. Ці моделі охоплюють історичні періоди (1860–1950) та сучасні дані (1984–2024), забезпечуючи комплексний підхід до аналізу. Використання векторних моделей дало змогу чітко відобразити планові деформації русел і визначити зони найбільш інтенсивних змін.

6. Методика, розроблена в рамках роботи, може бути адаптована для інших річкових басейнів. Застосування індексу NDWI для обробки супутникових знімків Landsat дозволяє автоматизувати ідентифікацію водних об'єктів із високою точністю. Ця методика підходить не лише для аналізу річкових систем, а й для моніторингу інших водних об'єктів, таких як озера чи водосховища. Карти з багатошаровим накладанням русла річки Сірет дозволяють простежити динаміку змін у просторі й часі, виявити зони інтенсивних трансформацій та

оцінити вплив природних і антропогенних факторів. Вона пропонує ефективні підходи до геоприв'язки, обробки даних і створення багатошарових карт, які можуть використовуватися для моніторингу водних ресурсів, дослідження руслових процесів та інтеграції в системи управління водними ресурсами. Впровадження цієї методики дозволить підвищити точність аналізу та ефективність використання природних ресурсів у контексті адаптації до змін клімату.

Список використаних джерел:

1. Беднарчик Л. І., Настюк М. Г. Порівняльний аналіз умов формування та проходження катастрофічних паводків в басейні р. Сірет влітку 1969 та 2008 років. Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Серія : Географія. Вінниця, 2009. Вип. 18. С. 25-32.
2. Клімат України / За ред. В. М. Ліпінського. Київ : Вид-во Расвського, 2003. 343 с.
3. Кожурина М. С. Геоморфологія долини ріки Серет у Прикарпатті. Праці. Експедиція по комплексному вивченню Карпат і Передкарпаття. 1957. Т. IV. С. 28-43.
4. Костенюк Л. В. Закономірності руслоформування у річковій системі Верхнього Пруту : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.07. Чернівці, 2012. 20 с.
5. Настюк М. Г. Гідролого-руслознавчий аналіз даних гідрометричних спостережень у басейнах Верхнього Пруту та Сірету : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.07. Чернівці, 2014. 20 с.
6. Паланичко О. В. Закономірності руслоформування річок Передкарпаття : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.07. Чернівці 2009. 20 с.
7. Пасічник М. Д. Геогідроморфологічний аналіз територіальної структури днищ долин основних річок Чернівецької області : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.07. Чернівці. 2012. 20 с.
8. Пасічник М. Д. Тенденції антропогенних змін русла та заплави Верхнього Сірету. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. Київ : Київський національний ун-т ім. Т. Шевченка, 2011. Т. 2(23). С. 63-74.
9. Смирнова В., Горшеніна Л. Структура і динаміка заплавно-руслових комплексів річки Сірет. Річкові долини. Природа-ландшафти-людина : Збірник наукових праць. Чернівці - Сосновець, 2007. С. 220-228.
10. Смирнова В.Г., Швець З.М. Палеогідрологія Верхнього Сірету. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. Київ : ВГЛ «Обрії», 2006. Т. II. С. 148-153.

11. Чернега П. І. Фактори формування та структура ландшафтів Сіретсько-Сучавського межиріччя (в межах України). Україна - Румунія: результати і перспективи транскордонного співробітництва в контексті євроінтеграційних процесів : тези міжн. наук. конф. Чернівці, 2007. С. 75-76.
12. Ющенко Ю. С., Пасічник М. Д. Морфологія річки Сірет в межах України. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2010. Т. 21. С. 24-34.
13. Явкін В. Г., Кирилюк А. О., Цепенда М. В. Розвиток базису ерозії басейну Пруту, Черемошу та Сірету. Річки і долини. Природа - ландшафти - людина : зб. наук, праць. Чернівці - Сосновець, 2007. С. 258-266.
14. Ahmad, A., Shafri, H. Z. M., & Sulaiman, M. S. (2014). Water Feature Extraction and Change Detection Using Multitemporal Landsat Imagery. *Remote Sensing*, 6(5), 4173–4189. DOI: 10.3390/rs6054173
15. Bratescu, C. (1928) Einige quartäre und imminente Flussanzapfungen in der Bukowina und in Pakutien. *Bul. fac. de stinti. din Cernauti*, V. II.
16. Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections—revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9), 1025–1036.
17. Congedo, L. (2021). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. *GitHub*.
Отримано 3
<https://github.com/semiautomaticgit/SemiAutomaticClassificationPlugin>
18. Esri. (2016). *ArcGIS Desktop: Release 10.4.1* [Комп'ютерне програмне забезпечення]. Отримано з <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.4/get-started/setup/arcgis-desktop-quick-start-guide.htm>
19. GeoData Tutorials. (2021). Calculating river sinuosity in QGIS. Отримано з <https://www.geodatatutorials.com/calculate-river-sinuosity-qgis>
20. Landsat Missions Overview. Retrieved from: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
21. Luo, S., & Wang, C. (2019). Analysis of River Channel Changes Using Remote Sensing and GIS Technology. *Journal of Hydrology*, 574, 1079–1092.
22. Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. Redlands, CA: Esri Press.
Отримано 3
<https://www.esri.com/~media/files/pdfs/library/fliers/pdfs/archydro.pdf>

23. Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: GIS for Water Resources*. Redlands, CA: Esri Press. Отримано 3
<https://www.esri.com/~media/files/pdfs/library/fliers/pdfs/archydro.pdf>
24. Masek, J. G., Vermote, E. F., Saleous, N. E., et al. (2006). A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990–2000. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1), 68–72. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.857030>
25. 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. DOI: 10.1080/01431169608948714
26. NASA. (n.d.). Landsat Instruments. Отримано 3
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-instruments>
27. QGIS Documentation, (n.d.). Working with Raster Data. Отримано 3
https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/working_with_raster/index.html
28. QGIS Documentation. (2020). *Working with Raster Data*. Отримано 3
https://docs.qgis.org/3.4/en/docs/user_manual/working_with_raster/index.html
29. QGIS Documentation. (2023). Processing Toolbox. У QGIS Documentation. Отримано 3
https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/processing/index.html
30. Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., C.E. Woodcock, R. G., Allen, B., & Scambos, T. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145, 154–172. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.001>
31. Sentinel Hub. EO Browser. Retrieved from: <https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>
32. Smith, A. B. (2020). River analysis using GIS tools: Extraction of centerlines and calculation of sinuosity. *Journal of Hydrological Studies*, 15(2), 123–130. <https://doi.org/10.1000/hydro.2020.15.2.123>
33. U.S. Geological Survey (USGS). (n.d.). Landsat Collections. Отримано 3
<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collections>

34. Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., et al. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment*, 122, 2-10.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010>
35. Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127-147.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>
36. 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>