

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2026.1.1>

УДК 528.8:556.53(477.85)

Пасічник М., Григорійчук В., Ющенко В., Оленчук Р.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ГЕОПРОСТОРОВА ІДЕНТИФІКАЦІЯ РУСЛОВИХ ТРАНСФОРМАЦІЙ ГИРЛОВОЇ ДІЛЯНКИ РІЧКИ ЧЕРЕМОШ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РАДАРНИХ ЗНІМКІВ SENTINEL-1

У представленій статті науково обґрунтовано комплексну методологію геопросторової ідентифікації та ретроспективного моніторингу руслових трансформацій гирлової ділянки річки Черемош за період з 2015 року по 2025 рік. Актуальність дослідження зумовлена високою динамічністю передгірських річок Карпатського регіону, де русла складені легкорозмивними алювіальними відкладами, а зміна гідрологічного режиму під впливом глобального потепління провокує стрімку активізацію латеральної ерозії. Традиційне використання багатоспектральних оптичних космічних знімків для цього регіону суттєво обмежується високою повторюваністю щільного хмарного покриву саме під час паводкових подій, коли відбуваються найбільш масштабні руслові переформування. Тому головним інструментом спостереження було безальтернативно обрано мікрохвильове радарне зондування місії Sentinel-1, яке гарантує всепогодний та цілодобовий моніторинг геометрії русла. Методологічна основа роботи базується на фізичних принципах взаємодії електромагнітного випромінювання С-діапазону з водною поверхнею, яка діє як дзеркальний відбивач. Для прецизійного детектування водного дзеркала та нівелювання впливу складної фоновієї вегетації у середовищі геоінформаційної системи QGIS було розраховано двополяризаційний водний індекс SDWI. Важливою технологічною інновацією дослідження є застосування вхідних даних виключно у лінійній шкалі інтенсивності зворотного розсіювання для каналів VV та VH, що гарантує строгу математичну коректність обчислень. Наступним ключовим етапом просторового аналізу стала бінаризація отриманих растрових зображень за допомогою самоадаптивного алгоритму Оцу. Цей підхід дозволив автоматично визначити оптимальний поріг сегментації та максимально об'єктивно відокремити водні масиви від вологих внутрішньоруслових галечникових кос. Після конвертації у векторний формат отримані первинні полігональні моделі пройшли необхідні процедури просторової фільтрації, буферизації та морфологічного згладжування, що у підсумку забезпечило гідроморфологічну коректність контурів. Результати векторного аналізу серії створених масок наочно підтвердили значну просторову динаміку річкової мережі. Особливо виразну тенденцію до латеральної міграції русла та інтенсифікацію бічної ерозії виявлено на контрольних ділянках впродовж міжмоніторингового періоду 2020–2025 років. Порівняльний аналіз довів, що конфігурація та суцільність ідентифікованого водного дзеркала є прямою функцією гідрологічної фази: від стану глибокої межні з фрагментованими рукавами у 2015 році до повноводних періодів наступних років. Запропонований відтворюваний автоматизований ГИС-підхід мінімізує суб'єктивізм експертних оцінок і формує надійну аналітичну базу для прогнозування гідроекологічних ризиків та розробки дієвих стратегій сталого управління флювіальними системами.

Ключові слова: радарне зондування, руслові трансформації, Sentinel-1, SDWI, QGIS.

Вступ. Сучасна флювіальна геоморфологія, гідрологія та екологія річкових басейнів переживають період глибокої методологічної трансформації, яка зумовлена експоненційним розвитком технологій дистанційного зондування Землі та впровадженням потужного аналітичного інструментарію геоінформаційних систем (ГИС). Історично моніторинг руслових деформацій, міграції берегових ліній, еволюції заплавних ландшафтів та оцінка ризиків затоплення базувалися переважно на трудомістких топографо-геодезичних польових зніманнях, а також на ретроспективному аналізі архівних картографічних матеріалів чи розрізнених аерофотознімків. Однак, такий підхід характеризується низькою просторово-часовою дискретністю та високою вартістю реалізації, що унеможливлює його використання для оперативного моніторингу на великих територіях.

Для гірських та передгірських територій, до яких належать басейни річок Карпатського регіону, застосування традиційних методів моніторингу ускладнюється специфічними фізико-географічними умовами. Річкові ландшафти [8, 13, 19] характеризуються високою енергією потоку, стрімким розвитком ерозійних процесів, частими русловими «міграціями»

та формуванням розгалужених багаторукавних систем з нестабільними галечниковими боковиками. Еволюція таких річкових русел найбільш інтенсивно відбувається під час екстремальних гідрологічних подій (паводків та повеней).

Тривалий час стандартом космічного моніторингу виступали оптичні багатоспектральні сенсори (місії Landsat 8/9, Sentinel-2), які використовують індекси нормалізованої різниці (наприклад, NDWI, MNDWI) для виділення водних об'єктів [12, 13, 15, 16]. Проте їх використання в умовах Карпат та інших гірських систем стикається з критичним бар'єром: високою повторюваністю щільного хмарного покриття, особливо у періоди інтенсивних опадів, коли відбуваються найбільш масштабні руслові трансформації. Окрім того, оптичні сенсори чутливі до каламутності води (значний вміст завислих наносів під час паводку змінює спектральний відбиток води, наближаючи його до спектра ґрунту) та затінення від високих берегів або рослинності.

Аналіз масиву наукових публікацій за останнє десятиліття засвідчує фундаментальний парадигмальний зсув у бік використання активних мікрохвильових сенсорів, зокрема радарів із синтезованою апертурою (Synthetic Aperture Radar – SAR). Запуск Європейським космічним агентством (ESA) супутникової місії Sentinel-1 (платформ 1A та 1B) у рамках програми Copernicus забезпечив наукову спільноту безкоштовними радіолокаційними даними з високою просторовою (10 м) та часовою (6-12 днів) роздільною здатністю [1, 2]. Технологія SAR забезпечує всепогодний та цілодобовий моніторинг, проникаючи крізь хмарний покрив і туман, що є критично важливим для фіксації внутрішньопаводкових змін геометрії русла [3, 4, 5, 7, 9].

Використання мікрохвильового зондування у С-діапазоні (центральна частота 5,405 ГГц, довжина хвилі $\lambda=5,5$ см), яке реалізоване на супутниках Sentinel-1, базується на складному комплексі взаємодій електромагнітного випромінювання з підстилаючою поверхнею Землі. На відміну від пасивних оптичних сенсорів, які фіксують відбите сонячне світло, SAR є активною системою: супутник випромінює мікрохвильові імпульси та вимірює інтенсивність (амплітуду) і фазу відбитого сигналу (зворотного розсіювання, backscattering).

Місія Sentinel-1 (у режимі Interferometric Wide swath – IW) забезпечує зйомку у двох поляризаційних каналах: VV (вертикальне випромінювання та вертикальний прийом) та VH (вертикальне випромінювання та горизонтальний прийом).

Як зазначається в дослідженнях паводків [7], стверджується, що поляризація VV є більш чутливою до вологості ґрунту та забезпечує вищу точність ідентифікації межі берега через менший рівень системного шуму. На противагу цьому, автори робіт Nasir та Cortes з співавторами [3, 10] наголошують на тому, що канал VH перевершує VV у складних ландшафтах із розвиненою прибережною вегетацією та в умовах вітряної погоди. Зважаючи на відсутність єдиного універсального каналу для всіх гідрологічних ситуацій, наукова думка еволюціонувала до створення комплексних індексів, що математично інтегрують переваги обох поляризацій.

Важливим методологічним аспектом препроцесингу SAR-даних для геопросторового аналізу гірських річок є вибір опорної площини для розрахунку коефіцієнта зворотного розсіювання. Традиційно більшість алгоритмів використовують параметр Sigma-naught σ^0 , який відображає розсіювання відносно площі, проєктованої на локально плоску поверхню референсного еліпсоїда (без урахування реального рельєфу).

Однак публікації доводять, що використання σ^0 для територій з інтенсивним розчленуванням рельєфу (таких, як Черемош) призводить до фатальних помилок класифікації. Схили, обернені до радара, повертають надмірно сильний сигнал (ефект foreshortening та layover), тоді як протилежні схили знаходяться в радіотіні (shadow) і повертають нульовий сигнал. Алгоритми водовиділення автоматично класифікують чорні пікселі радіотіней як воду, що призводить до появи "флувіальних озер" на схилах гір.

У відповідь на виклики використання одиничних поляризацій SAR та нестабільності оптичних даних, у 2019 році дослідники Jia, Yang, Wang та Zhang [6] у своїй фундаментальній праці запропонували двополяризаційний водний індекс Sentinel-1 (Sentinel-1 Dual-Polarized Water Index – SDWI). Цей індекс швидко став методологічним стандартом для гідроморфологічного моніторингу за допомогою радарних даних.

Zhai M. та співавтори [20] у своєму дослідженні провели пряме порівняння індексу SDWI з алгоритмом машинного навчання Random Forest (RF). Автори зазначають, що хоча

індекс SDWI добре підходить для виділення дрібних водних об'єктів, він є дуже вразливим до шумових перешкод на радарних знімках та складного рельєфу.

Jia P. та співавтори [6] у процесі подальших тестувань на великих просторових масивах підтвердили, що використання виключно одного методу розрахунку SDWI має певні обмеження при екстракції води. Тому вони наполягають на необхідності інтеграції цього індексу з багатокроковими адаптивними алгоритмами сегментації (наприклад, об'єктно-орієнтованою класифікацією) для усунення впливу гір та забудови.

Методологія та дані. Сучасне руслознавство та гідроморфологія вимагають впровадження високоточних методів дистанційного зондування Землі, здатних забезпечити безперервний моніторинг динамічних об'єктів у складних фізико-географічних умовах. Для Карпатського регіону, що характеризується високою повторюваністю хмарності та інтенсивними паводковими процесами, використання оптичних сенсорів часто є обмеженим. У цьому контексті технологія радара із синтезованою апертурою (SAR), реалізована в супутниковій місії Sentinel-1 (платформи A, B та перспективна C), виступає як найбільш релевантний інструмент всепогодного та цілодобового спостереження за станом руслових систем [3, 10].

Фізична основа детектування водних поверхонь за допомогою SAR базується на аналізі зворотного розсіювання мікрохвильового випромінювання С-діапазону (центральна частота 5,405 ГГц, $\lambda=5,5$ см). Взаємодія сигналу з поверхнею визначається її діелектричними властивостями та геометричною шорсткістю. Вода, маючи високу діелектричну проникність, діє як дзеркальний відбивач (specular reflector) для падаючої радіохвилі під похилим кутом зйомки. Більша частина енергії відбивається у напрямку від сенсора, що призводить до формування низьких значень коефіцієнта зворотного розсіювання (σ^0). На радарних амплітудних знімках такі зони візуалізуються як темні ділянки, що дозволяє проводити чітку сегментацію водного дзеркала.

Порівняльний аналіз наукових підходів до вибору поляризації (VV — вертикальне випромінювання та прийом, VH — вертикальне випромінювання, горизонтальний прийом) демонструє відсутність єдиної думки серед дослідників, що зумовлено специфікою локальних умов. Kim та співавтори [7] на основі аналізу паводка 2017 року (Сент-Луїс, США) стверджують, що поляризація VV є більш чутливою до вологості та забезпечує вищу точність ідентифікації межі «вода-суходіл» через менший рівень шуму. На противагу цьому, Nasir [10] та дослідження Cortes [3] підкреслюють переваги крос-поляризації VH у складних ландшафтах із розвиненою вегетацією, де VV-канал може генерувати хибні результати через вплив вітрового хвилювання на поверхні води.

Використання ГІС-інструментарію QGIS є критично необхідним для препроцесингу даних Sentinel-1 GRD (Ground Range Detected) для нашого дослідження.

Особливу складність для руслових досліджень у басейні р. Черемош створює гірський рельєф, що спричиняє значні геометричні дисторсії: foreshortening (стиснення схилу), layover (накладання) та shadow (радіотінь). Ефект накладання виникає, коли сигнал від вершини хребта досягає сенсора швидше, ніж від його підніжжя, що призводить до «наповзання» зображення схилу на русло річки. Радіотінь (shadow) формується в зонах, недоступних для прямого опромінення, і характеризується нульовим сигналом, що часто ідентифікується алгоритмами як відкрита вода.

Ідентифікація водної поверхні в руслових системах розгалуженого типу, до яких належить річка Черемош, вимагає використання алгоритмів, здатних нівелювати вплив складних фонових об'єктів: вологих наносів на островах, прибережної вегетації та тіней від високих берегів. У сучасних гідроморфологічних дослідженнях стандартним підходом є застосування двополяризаційного водного індексу Sentinel-1 Dual-Polarized Water Index (SDWI), запропонованого Jia та інші у 2019 році [6].

Використання ГІС-платформи QGIS (версії 3.28 та вище) у поєднанні з даними радарного зондування Sentinel-1 дозволяє реалізувати повний цикл обробки геопросторових даних: від розрахунку спектральних індексів до фінальної векторизації та статистичного аналізу деформацій. Для гирлової ділянки річки Черемош, що характеризується розгалуженим руслом та високою часткою змішаних пікселів на межі «вода-алювій», вибір алгоритмів обробки має критичне значення для точності фінальних картографічних моделей.

Відповідно до технічних параметрів експорту даних із Copernicus Browser (див. рис. 1), для коректної реалізації цієї формули в «Калькуляторі растрових шарів» QGIS вкрай важливо використовувати канали VV - linear gamma0 та VH - linear gamma0. Вибір лінійної шкали (linear units) замість логарифмічної (decibel) є критичним, оскільки математичні операції множення та логарифмування в SDWI передбачають роботу з первинними значеннями потужності сигналу. Використання 32-бітного формату з плаваючою комою (32-bit float), зафіксованого на налаштуваннях завантаження, забезпечує збереження прецизійної точності розрахунків, що є обов'язковим для виділення вузьких проток. Експорт даних з бази даних Copernicus у форматі TIFF (32-bit float) забезпечує збереження фізичної точності сигналу, необхідної для детектування вузьких рукавів Черемошу шириною 5-15 м. Тому для подальшого опрацювання нами було завантажено радарні знімки за 2.11.2015, 3.11.2020 та 3.11.2025. Листопад місяць був обраний нами не випадково, оскільки ми можемо сміливо стверджувати, що водна поверхня ще не була покрита льодом, але дерева та чагарники, що ростуть обабіч річки, не перешкоджають радарним вимірюванням.

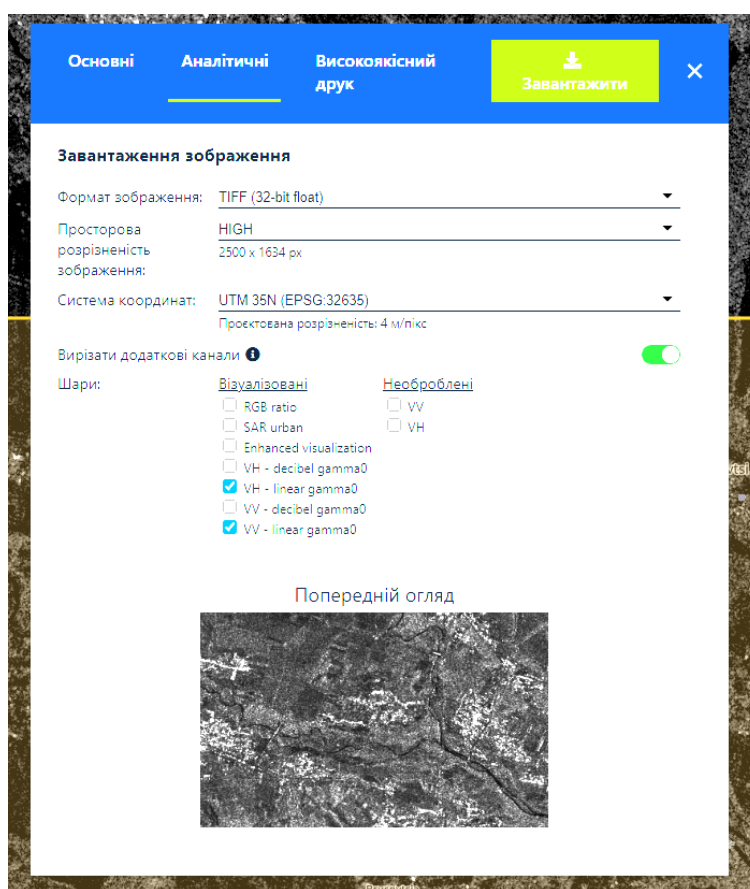


Рис.1. Параметри експорту аналітичного SAR-зображення у форматі TIFF для досліджуваної ділянки р. Черемош

Застосування при завантаженні проектованої системи координат UTM 35N (EPSG:32635), як показано на інтерфейсі завантаження (рис.1), відповідає західному регіону України. Це дозволяє проводити векторизацію русла без додаткових геометричних спотворень площ та довжин, що критично для оцінки інтенсивності бічної ерозії. Таким чином, інтеграція індексу SDWI, лінійних Gamma0-каналів в ГІС-середовищі створює стійку технологічну схему для прецизійного моніторингу руслових трансформацій річки Черемош.

Використання SDWI замість аналізу одиничних поляризацій (VV або VH) обумовлене фізикою розсіювання мікрохвильового сигналу. Як встановлено у роботах Silva Júnior et al. (2024), вода як дзеркальний відбивач демонструє низькі значення інтенсивності в обох каналах, проте саме їх логарифмічна комбінація дозволяє максимально розширити спектральну дистанцію між водою та суходолом. Математична модель розрахунку в QGIS базується на формулі [14]:

$$SDWI = \ln(10 * VV * VH) - 8. \quad (1)$$

Реалізація цієї формули в інструменті «Калькулятор растрових шарів» для безпосереднього створення растру індексу SDWI (рис.2).



Рис. 2. Результати розрахунку індексу SDWI для моніторингу стану русла р. Черемош (станом на 2015 рік)

Особливістю протікання русла Черемошу, де площа водного дзеркала значно варіює між меженню та паводком, фіксовані пороги (наприклад, $SDWI > 0$) можуть давати суттєві похибки. Тому подальше опрацювання **растрового поля, побудованого за індексом SDWI** (рис. 2), потребує опрацювання за допомогою методу Otsu [11], який дозволяє ідентифікувати руслові зміни навіть за наявності «шумових» ефектів від вологих гравійних кос. Метод, запропонований Нобуюкі Оцу в 1979 році, базується на принципах класичного дискримінантного аналізу. Його головна мета — автоматично визначити такий поріг яскравості t , який би забезпечував мінімальну дисперсію всередині класів (intra-class variance) та, відповідно, максимальну дисперсію між класами (inter-class variance) [Otsu, 1979; Zitti et al., 2023]. Даний підхід був успішно апробований на річці Тальяменто (Італія), яка є морфологічним аналогом Черемошу, де алгоритм Self-Adaptive Thresholding Approach (SATA) на основі Otsu показав точність ідентифікації русла понад 96%. Особливістю полягає у можливості пакетної обробки часових рядів Sentinel-1, що важливо для ретроспективного аналізу за 2015–2025 роки. При роботі з розгалуженими руслами часто виникає проблема «змішаних пікселів» (mixed pixels) на межі води та галечникових відкладів. Як зазначають у своїх роботах Li et al. [9] та Jia et al. [6], індекс SDWI мінімізує вплив шорсткості ґрунту та вегетації, що дозволяє більш чітко детектувати межі Черемошу порівняно з індексом NDWI, що розраховується за оптичними даними Sentinel-2, які часто спотворюються через каламутність води під час паводків.

Наступним етапом нашого дослідження є обґрунтування використання алгоритму Otsu для бінаризації отриманого індексу базується на його здатності до автоматичного пошуку оптимального порогу сегментації шляхом максимізації міжкласової дисперсії для гірлової ділянки річки Черемош.

У середовищі QGIS реалізація методу Otsu можна виконати за допомогою модуля Гістограма (рис. 3) виконання бінаризації розрахованого шару SDWI. Враховуючи динамічність руслових процесів Черемошу, застосування статичних порогів є малоефективним. Обґрунтованим є використання алгоритму Оцу (Otsu's method), який автоматично визначає оптимальний поріг розділення класів шляхом максимізації міжкласової дисперсії [11, 21].

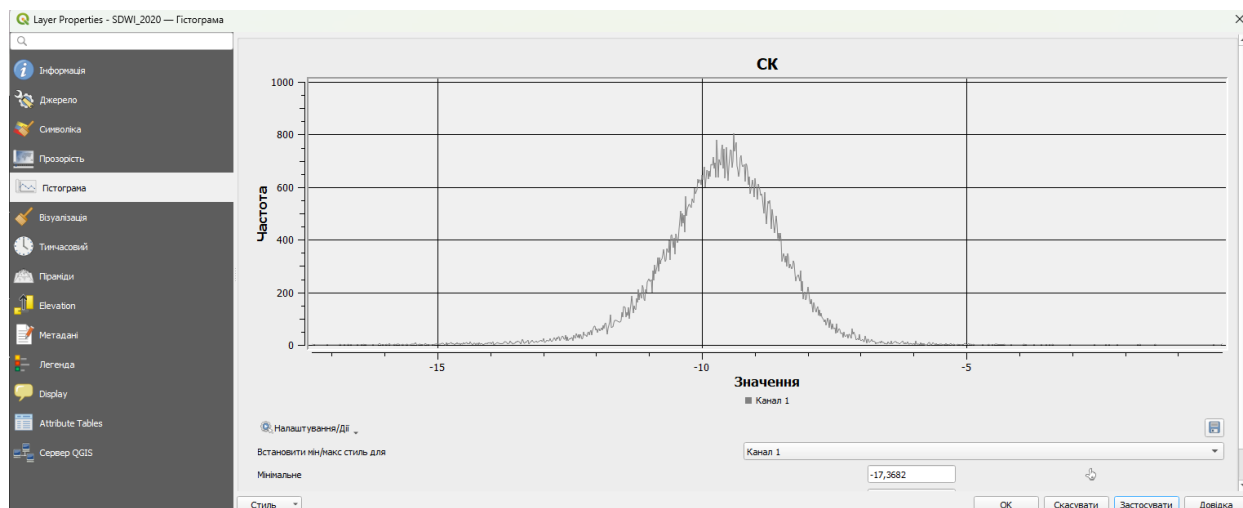


Рис. 3. Гістограма розподілу значень індексу SDWI_2020 для гирлової ділянки р. Черемош (станом на 2020 рік)

Для побудови бінарної маски гирлової ділянки р. Черемош нам необхідно було використати «Растровий калькулятор» в QGIS — саме він опрацьовує такі вирази, як логічну умову. Він перевіряє кожен піксель растрів SDWI (у нашому випадку за 2015, 2020 та 2025 роки). З гістограми на рисунку 3, можна побачити що пороговим значенням є число – 13.

Гідрологічний зміст цих гістограм наступний: оскільки відкрита вода працює як дзеркало для радіолокаційного сигналу супутника (відбиває його вбік від сенсора), водні об'єкти мають найнижчі значення зворотного розсіювання на знімку. Отож, усі інші пікселі (сухі галечники, рослинність, ґрунт), які мають значення вище порогового (від -13 і більше), отримають значення 0, формуючи сушу. [Conversi et al., 2024]. Якщо значення пікселя дійсно менше ніж -13 (рис. 3), умова вважається істинною, і цьому пікселю у новому шарі автоматично присвоюється значення 1 і будуть дзеркалом води. Результат такого розрахунку можна побачити на рис. 4.

Для подальшого переходу до векторного аналізу водної поверхні річки, бінарний растр конвертується у векторний шар полігонів (інструмент перетворення, пункт «Полігенізувати (растр у вектор)/Polygonize (Raster to Vector)»). Отриманий шар містить велику кількість «шумових» полігонів — артефактів, спричинених спекл-шумом радара або вологими заглибинами на заплаві [14].

Процес фільтрації в QGIS виконується через аналіз атрибутивної таблиці векторизованого шару. Щоб у цьому шарі залишити тільки водну поверхню (значення води тут «DN=1»), необхідно ідентифікувати, виділити та видалити в атрибутивній таблиці все, що не є водою через формулу «DN=0». Такий підхід забезпечує чистоту даних для подальшого розрахунку морфометричних показників. Також необхідне видалення залишків шумів за допомогою «грубого» обведення русла полігональним векторним шаром [14]. Далі необхідно провести процедуру обтинання векторного полігону, з якого ми видалили атрибути, що не відповідають водній поверхні (рис.5).

Оскільки роздільна здатність Sentinel-1 становить 10 м, межі векторизованого русла мають характерний ступенчастий (піксельний) вигляд (рис. 6). Для отримання гідроморфологічно коректних контурів застосовується двоетапна процедура:

1. Буферизація (+10 та -10 метрів): Використання інструменту позитивного буфера (+10 м) в QGIS дозволяє об'єднати розірвані через пікселізацію сегменти вузьких проток чи неідентифіковані пікселі. Наступне застосування негативного буфера (-10 м) повертає

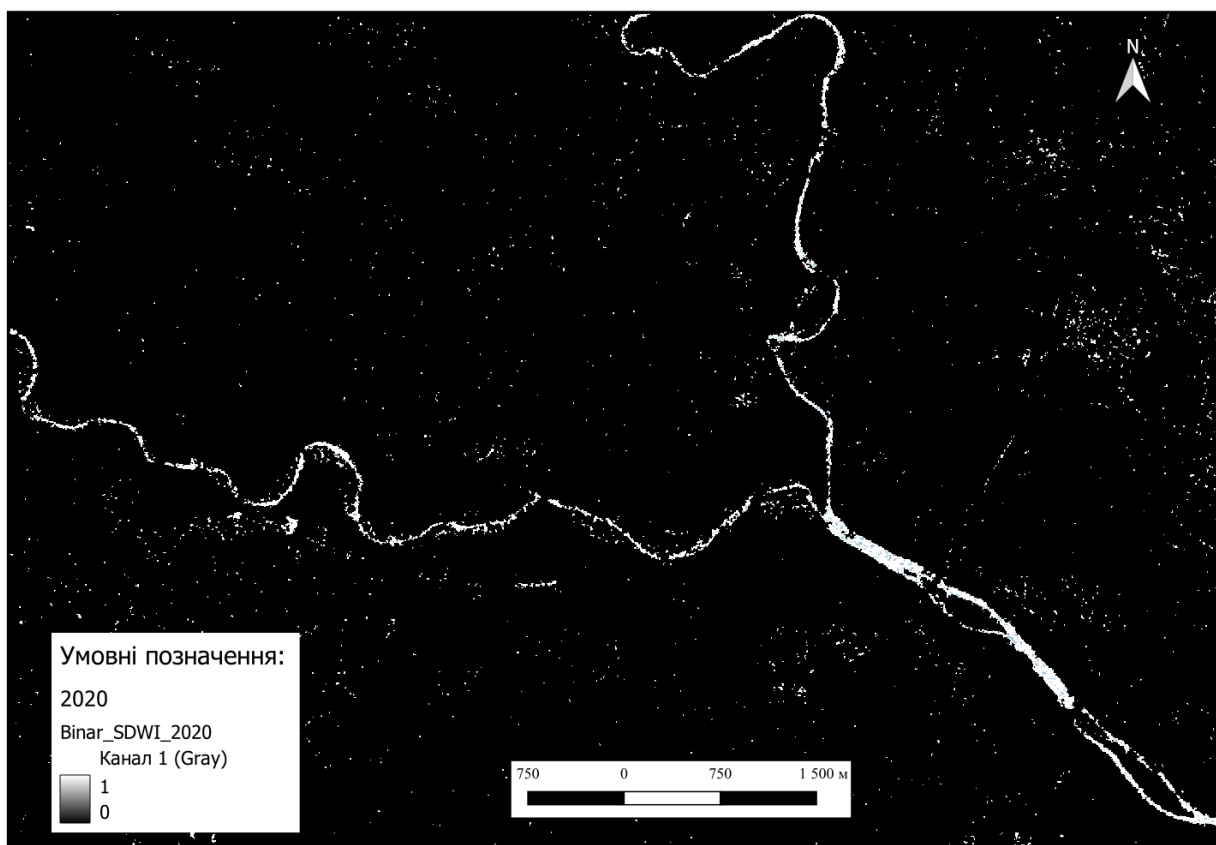


Рис. 4. Бінарна маска гирлової ділянки р. Черемош, отримана на основі індексу SDWI (2020 р.)



Рис. 5. Результати первинної ідентифікації водного дзеркала річки Черемош у межах зони обтинання без застосування морфологічних модифікацій (2025 рік)

об'єкт до вихідних габаритів, одночасно «закриваючи» дрібні внутрішні порожнечі та нівелюючи виступи окремих пікселів. Необхідно додати, що після процесу буферизації +10 необхідно проводити злиття/об'єднання всіх об'єктів даного шару.

2. Застосування алгоритму згладжування (Smoothing): У QGIS використовується інструмент «Smooth» (алгоритм Гауссового згладжування) [Conversi et al., 2024; Zitti et al., 2023]. Це дозволяє трансформувати кутасті межі полігонів у плавні криві, що краще відповідають реальній морфології річкових берегів. Кількість ітерацій згладжування (зазвичай 2-3) підбирається таким чином, щоб не допустити значного зміщення площі водного дзеркала, зберігаючи при цьому візуальну та аналітичну якість карти (рис.6).



Рис. 6. Векторна модель русла річки Черемош після просторової фільтрації та морфологічного згладжування (станом на 2020 рік)

Завершальним етапом є перевірка топологічної цілісності отриманого шару та його підготовка до кількісного аналізу бічної міграції русла Черемошу в межах алювіальної рівнини за період 2015–2025 років (рис.7).

Застосування методів дистанційного зондування Землі у поєднанні з аналітичними потужностями геоінформаційних систем, на сучасному етапі розвитку руслознавства є безальтернативним інструментом для проведення ретроспективного моніторингу та кількісної оцінки планових деформацій річкових систем за період проведення радарних місій.

Огляд представлених картографічних матеріалів свідчить про значну динамічність руслової мережі досліджуваної ділянки. Особливу увагу привертають контрольні точки 3 та 4, де зафіксовано найбільш виражену тенденцію до латеральної міграції русла в межах багаторічної смуги руслоформування. В точці 2 ми можемо бачити відмирання рукава, а в точці 1 зміщення русла під лівий берег до 40 метрів. Порівняльний аналіз трьох часових зрізів демонструє, що положення 2015 року (помаранчевий колір) та 2020 року (синій колір) характеризувалися відносною стабільністю осьової лінії меандри, проте знімок за листопад 2025 року (зелений колір) фіксує суттєве зміщення водної маски у бік лівого берега.

Кількісна оцінка даних зміщень (близько 60 м в точках 3 та 4) вказує на інтенсифікацію бічної ерозії, що може бути наслідком проходження серії паводків високої водності в міжмоніторинговий період 2020–2025 років. Такі процеси є типовими для передгірських річок Карпатського регіону, де русла складені алювіальними відкладами [17, 21].



Рис. 7. Динаміка планового положення русла р. Черемош на контрольних ділянках латеральної міграції (точки 1–4) за даними SAR-моніторингу (2015–2025 рр.)

Різна товщина ідентифікованого русла та варіативність суцільності водної поверхні за різні роки пояснюються насамперед гідрологічною фазою на момент зйомки та метеорологічними умовами. Ширина дзеркала води на SAR-знімках є прямою функцією миттєвої витрати води. Фрагментарність і менша ширина русла у 2015 році свідчать про стан глибокої межені, коли потік розбивається на окремі рукави, оголюючи внутрішньоруслові наноси — коси та осередки. Оскільки ці акумулятивні форми мають високу шорсткість, вони створюють інтенсивне розсіювання сигналу, що сприймається алгоритмами QGIS як суходіл, призводячи до «розривів» у масці русла. Навпаки, більша товщина контуру у 2020 та 2025 роках вказує на фазу підвищеної водності, при якій затоплюються низькі рівні заплави та внутрішні морфологічні елементи русла.

Наукове обґрунтування того, чому саме за 3 листопада 2020 року водна поверхня ідентифікована найкращим чином, полягає в синергії гідрометеорологічних чинників. По-перше, на цей період припала оптимальна водність, що забезпечила заповнення основного русла без надмірного затоплення заплавної рослинності, яка могла б створити ефект подвійного відбиття. По-друге, критичне значення має швидкість вітру: за умови штилю водна поверхня стає ідеальним дзеркалом для сигналу Sentinel-1, формуючи максимальний радіометричний контраст із береговою лінією. Це дозволило в середовищі QGIS за допомогою Raster Calculator застосувати метод порогової класифікації (Thresholding) з високою точністю, де поріг інтенсивності зворотного розсіювання для каналу VH був чітко локалізований у лівій частині гістограми. Відсутність спекл-шуму, спричиненого вітровим хвилюванням, нівелювала ймовірність помилкової класифікації «вода-суходіл» [18, 21].



Рис. 8. Картосхема ретроспективного моніторингу планових деформацій русла р. Черемош у межах багаторічної смуги руслоформування за результатами обробки радарних знімків у середовищі QGIS

Інтегроване використання даних Sentinel-1 у QGIS дозволяє не лише констатувати факт деформацій, а й проводити аналіз їхньої спрямованості у взаємозв'язку з ландшафтною структурою річкової долини. У точках 1, 3 та 4 також спостерігається розвиток меандруючих закрутів, що підтверджує активну фазу формування сучасного річково-долинного ландшафту. Поєднання радарної зйомки з автоматизованою векторизацією в QGIS мінімізує суб'єктивізм дослідника та створює надійну базу для прогнозування гідроекологічних ризиків, таких як загроза руйнування інженерних споруд або підтоплення населених пунктів. Таким чином, проведений моніторинг за 2015–2025 рр. є фундаментом для наукового обґрунтування принципів планування сталого розвитку річкових геосистем у межах Чернівецької області [cite: 2, 5].

Висновок. За результатами проведеного дослідження можна обґрунтовано стверджувати, що інтеграція даних мікрохвильового радарного зондування та аналітичного інструментарію геоінформаційних систем є найбільш ефективним технологічним підходом для ретроспективного моніторингу руслових трансформацій передгірських річок Карпатського регіону. Проаналізована гірлова ділянка річки Черемош відзначається надзвичайно високою динамічністю геоморфологічних процесів, де русло сформоване переважно з легкорозмивних алювіальних відкладів, що в умовах сучасних кліматичних флуктуацій та нерівномірного гідрологічного режиму призводить до стрімкої активізації бічної ерозії. Традиційні методи моніторингу, які опираються виключно на оптичні багатоспектральні знімки, виявилися об'єктивно обмеженими через високу повторюваність щільного хмарного покриття в періоди екстремальних паводків, тоді як залучення активних мікрохвильових сенсорів місії Sentinel-1 гарантувало безперебійне всепогодне спостереження за еволюцією флювіального рельєфу. Фундаментальною методологічною перевагою розробленого підходу є обчислення двополяризаційного водного індексу SDWI на основі лінійних значень інтенсивності зворотного розсіювання для радарних каналів VV та VH, що забезпечило математично точну та прецизійну сегментацію відкритого водного

дзеркала. Наступна процедура автоматизованої бінаризації растрових зображень із залученням самоадаптивного алгоритму Оцу довела свою спроможність ефективно та без суб'єктивного впливу відокремлювати водні масиви від вологих внутрішньоруслових об'єктів. Подальше застосування алгоритмів векторної фільтрації, просторової буферизації та згладжування в програмному середовищі QGIS дозволило повністю нівелювати спекл-шуми та сформувати гідроморфологічно коректні контури берегових ліній. Проведений ретроспективний векторний аналіз планових деформацій за десятирічний період з 2015 року по 2025 рік переконливо зафіксував активну фазу трансформації сучасного річково-долинного ландшафту гирлової ділянки Черемошу. Найбільш масштабні латеральні зміщення головного русла та інтенсивний розвиток меандр відбулися у проміжку 2020–2025 років. Водночас дослідження довело, що суцільність автоматично виділеного русла сильно залежить від гідрологічної фази на момент зйомки. Фрагментарний характер маски у 2015 році чітко ідентифікує стан межени, коли потік розбивався на ізольовані рукави, оголюючи галечникові коси, що провокували розсіювання сигналу.

Підсумовуючи, варто зазначити, що нами успішно апробована геопросторова технологія формує інноваційну науково-методичну базу для проведення комплексних досліджень. Поєднання всепогодних даних Sentinel-1 з ГІС-інструментарієм QGIS гарантує високу репрезентативність результатів моніторингу швидкостей міграції русел.

Отримані цифрові матеріали є критично важливим базисом для прогнозування гідроекологічних загроз, профілактики ризиків руйнування інженерної інфраструктури та слугуватимуть науковим обґрунтуванням для сучасних стратегій сталого управління водними ресурсами Карпатського макрорегіону.

Список літератури

1. *Copernicus*. Comparison of Sentinel-2 and Landsat Data for Surface Water Mapping. Available at: Copernicus. Comparison of Sentinel-2 and Landsat Data for Surface Water Mapping, 2022. URL: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2-comparison-sentinel-2-and-landsat>
2. *Copernicus Land Monitoring Service*. Products including DEM. URL: <https://land.copernicus.eu/>
3. Cortes V., Jaramillo Pineda J. A., Echeverri C., Gonzáles C., Bolaños S., Olmos C., Díaz J. Sentinel-1 SAR imagery (VV and VH polarization) for hydraulic dynamics analysis in the Bajo Cauca region, Antioquia–Colombia. Mendeley Data. 2025. V1. URL: <https://doi.org/10.17632/h6p2c3ffkd.1>.
4. Henderson R. E., Farris A. S., Kratzmann M. G. et al. Digital Shoreline Analysis System version 6.1: U.S. Geological Survey software release. U.S. Geological Survey, 2026. URL: 10.5066/P1NHMJNC.
5. Himmelstoss E. A., Henderson R. E., Kratzmann M. G., Farris A. S. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179. 2018. 110 p. URL: <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>.
6. Jia P., Yang Z., Wang J., Zhang G. Sentinel-1 derived water index (SDWI) for large-scale water body identification. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2019. Vol. 12, № 6. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2897861>.
7. Kim J. C., Choi Y. J., Yoon Y. J. Application Research of Sentinel-1 SAR in Flood Range Extraction and Polarization Analysis. Journal of Geo-information Science. 2021. Vol. 23, № 6. P. 1063–1070. URL: <https://doi.org/10.12082/dqxkx.2021.200717>.
8. Langat P. K., Kumar L., Koech R. K. Monitoring river channel dynamics using remote sensing and GIS techniques. Geomorphology. 2019. Vol. 325. P. 92–102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.007>.
9. Li X. et al. Flood water extraction in the hilly Poyang Lake region using Sentinel-1 SAR data and CAU-Net. Remote Sensing. 2023. Vol. 15, № 21. P. 5247. URL: <https://doi.org/10.3390/rs15215247>.
10. Nasir A. et al. Enhancing Flood Detection in Surabaya: A Comparative Study of VV and VH Polarizations with Sentinel-1 Data. Journal of Civil Engineering. 2023. Vol. 40, № 1. P. 89–102. URL: <https://doi.org/10.17632/h6p2c3ffkd.1>.
11. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9, № 1. P. 62–66. URL: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.
12. Pasichnyk M., Buzey O. Inventory and functional classification of ponds based on Sentinel-2 NDWI data in the Sovytsia Kitsmanska River basin (Ukraine). Науковий вісник Чернівецького університету: Географія. 2025. № 854. С. 150–169. URL: <https://doi.org/10.31861/geo.2025.854.150-169>.
13. Pasichnyk M., Yushchenko Y., Palanychko O. et al. Remote sensing and GIS in the research of young river landscape. Grassroots Journal of Natural Resources. 2025. Vol. 8, № 1. P. 163–189. URL: <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080106>.

14. *Calculating raster area (QGIS3)*. QGIS Tutorials. 2023. URL: https://www.qgistutorials.com/en/docs/3/calculating_raster_area.html
15. *Rapinel S., Fabre E., Dufour S. et al.* Mapping potential, existing and efficient wetlands using free remote sensing data. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 247. P. 829–839. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.098>.
16. *Rizzoli P., Martone M., Gonzalez C. et al.* Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. Vol. 132. P. 119–139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>.
17. *Silva Júnior J., Silva Júnior J.* Water Body Extraction using Artificial Neural Networks and Sentinel-1. *Sociedade & Natureza*. 2024. Vol. 36. e70654. URL: <https://doi.org/10.14393/SN-v36-2024-70654>.
18. *Tan J., Tang Y., Liu B. et al.* A Self-Adaptive Thresholding Approach for Automatic Water Extraction Using Sentinel-1 SAR Imagery Based on OTSU Algorithm and Distance Block. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, № 10. P. 2690. URL: <https://doi.org/10.3390/rs15102690>.
19. *Yushchenko Yu. S., Pasichnyk M. D., Darchuk K. V. et al.* Contemporary geoinformation technologies in postmodern education of geographers, hydrometeorologists, land surveyors. *Postmodern Openings*. 2022. Vol. 13, № 2. P. 409–429. URL: <https://doi.org/10.18662/po/13.2/462>.
20. *Zhai M. et al.* Water Body Extraction Methods for SAR Images Fusing Sentinel-1 Dual-Polarized Water Index and Random Forest. *Sensors (Basel)*. 2025. Vol. 25, № 15. P. 4868. URL: <https://doi.org/10.3390/s25154868>.
21. *Zitti G. et al.* A Self-Adaptive Thresholding Approach for Automatic Water Extraction Using Sentinel-1 SAR Imagery Based on OTSU Algorithm. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, № 10. P. 2690. URL: <https://doi.org/10.3390/rs15102690>.

Reference

1. *Copernicus*. Comparison of Sentinel-2 and Landsat Data for Surface Water Mapping. Available at: Copernicus. Comparison of Sentinel-2 and Landsat Data for Surface Water Mapping, 2022. URL: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2-comparison-sentinel-2-and-landsat>
2. *Copernicus Land Monitoring Service*. Products including DEM. URL: <https://land.copernicus.eu/>
3. *Cortes V., Jaramillo Pineda J. A., Echeverri C., Gonzáles C., Bolaños S., Olmos C., Díaz J.* Sentinel-1 SAR imagery (VV and VH polarization) for hydraulic dynamics analysis in the Bajo Cauca region, Antioquia–Colombia. *Mendeley Data*. 2025. V1. URL: <https://doi.org/10.17632/h6p2c3ffkd.1>.
4. *Henderson R. E., Farris A. S., Kratzmann M. G. et al.* Digital Shoreline Analysis System version 6.1: U.S. Geological Survey software release. U.S. Geological Survey, 2026. URL: 10.5066/P1NHMJNC.
5. *Himmelstoss E. A., Henderson R. E., Kratzmann M. G., Farris A. S.* Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179. 2018. P. 1–110. URL: <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>.
6. *Jia P., Yang Z., Wang J., Zhang G.* Sentinel-1 derived water index (SDWI) for large-scale water body identification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2019. Vol. 12, № 6. P. 1–15. URL: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2897861>.
7. *Kim J. C., Choi Y. J., Yoon Y. J.* Application Research of Sentinel-1 SAR in Flood Range Extraction and Polarization Analysis. *Journal of Geo-information Science*. 2021. Vol. 23, № 6. P. 1063–1070. URL: <https://doi.org/10.12082/dqxkx.2021.200717>.
8. *Langat P. K., Kumar L., Koech R. K.* Monitoring river channel dynamics using remote sensing and GIS techniques. *Geomorphology*. 2019. Vol. 325. P. 92–102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.007>.
9. *Li X. et al.* Flood water extraction in the hilly Poyang Lake region using Sentinel-1 SAR data and CAU-Net. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, № 21. P. 5247. URL: <https://doi.org/10.3390/rs15215247>.
10. *Nasir A. et al.* Enhancing Flood Detection in Surabaya: A Comparative Study of VV and VH Polarizations with Sentinel-1 Data. *Journal of Civil Engineering*. 2023. Vol. 40, № 1. P. 89–102. URL: <https://doi.org/10.17632/h6p2c3ffkd.1>.
11. *Otsu N.* A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. Vol. 9, № 1. P. 62–66. URL: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>.
12. *Pasichnyk M., Buzey O.* Inventory and functional classification of ponds based on Sentinel-2 NDWI data in the Sovytsia Kitsmanska River basin (Ukraine). *Naukovyi visnyk Chernivetskoho universytetu: Heohrafiia*. 2025. № 854. S. 150–169. URL: <https://doi.org/10.31861/geo.2025.854.150-169>.
13. *Pasichnyk M., Yushchenko Y., Palanychko O. et al.* Remote sensing and GIS in the research of young river landscape. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2025. Vol. 8, № 1. P. 163–189. URL: <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.080106>.
14. *Calculating raster area (QGIS3)*. QGIS Tutorials. 2023. URL: https://www.qgistutorials.com/en/docs/3/calculating_raster_area.html

15. *Rapinel S., Fabre E., Dufour S. et al.* Mapping potential, existing and efficient wetlands using free remote sensing data. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 247. P. 829–839. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.098>.
16. *Rizzoli P., Martone M., Gonzalez C. et al.* Generation and performance assessment of the global TanDEM-X digital elevation model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2017. Vol. 132. P. 119–139. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.008>.
17. *Silva Júnior J., Silva Júnior J.* Water Body Extraction using Artificial Neural Networks and Sentinel-1. *Sociedade & Natureza*. 2024. Vol. 36. e70654. URL: <https://doi.org/10.14393/SN-v36-2024-70654>.
18. *Tan J., Tang Y., Liu B. et al.* A Self-Adaptive Thresholding Approach for Automatic Water Extraction Using Sentinel-1 SAR Imagery Based on OTSU Algorithm and Distance Block // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, № 10. P. 2690. URL: <https://doi.org/10.3390/rs15102690>.
19. *Yushchenko Yu. S., Pasichnyk M. D., Darchuk K. V. et al.* Contemporary geoinformation technologies in postmodern education of geographers, hydrometeorologists, land surveyors. *Postmodern Openings*. 2022. Vol. 13, № 2. P. 409–429. URL: <https://doi.org/10.18662/po/13.2/462>.
20. *Zhai M. et al.* Water Body Extraction Methods for SAR Images Fusing Sentinel-1 Dual-Polarized Water Index and Random Forest. *Sensors (Basel)*. 2025. Vol. 25, № 15. P. 4868. URL: <https://doi.org/10.3390/s25154868>.
21. *Zitti G. et al.* A Self-Adaptive Thresholding Approach for Automatic Water Extraction Using Sentinel-1 SAR Imagery Based on OTSU Algorithm. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, № 10. P. 2690. URL: <https://doi.org/10.3390/rs15102690>.

Geospatial Identification of Channel Transformations in the Mouth Section of the Cheremosh River Using Sentinel-1 Radar Imagery

Pasichnyk M., Hryhoriichuk V., Yushchenko V., Olenchuk R.

The presented article scientifically substantiates a comprehensive methodology for the geospatial identification and retrospective monitoring of channel transformations in the estuary section of the Cheremosh River for the period from 2015 to 2025. The relevance of the study is driven by the high dynamics of foothill rivers in the Carpathian region, where the channels are composed of easily erodible alluvial deposits, and the change in the hydrological regime under the influence of global warming provokes a rapid intensification of lateral erosion. The traditional use of multispectral optical satellite imagery for this region is significantly limited by the high recurrence of dense cloud cover precisely during flood events, when the most large-scale channel reformation occurs. Therefore, the microwave radar sensing of the Sentinel-1 mission was unequivocally chosen as the primary observation tool, ensuring all-weather and round-the-clock monitoring of the channel geometry.

The methodological basis of the work relies on the physical principles of the interaction of C-band electromagnetic radiation with the water surface, which acts as a specular reflector. To precisely detect the water mirror and mitigate the influence of complex background vegetation, the Sentinel-1 Dual-Polarized Water Index (SDWI) was calculated within the QGIS geoinformation system environment. An important technological innovation of the study is the use of input data exclusively in the linear scale of backscattering intensity for the VV and VH channels, which guarantees strict mathematical correctness of the calculations.

The next key stage of the spatial analysis was the binarization of the obtained raster images using the self-adaptive Otsu's algorithm. This approach made it possible to automatically determine the optimal segmentation threshold and maximally objectively separate water bodies from wet intra-channel gravel bars. After conversion to a vector format, the resulting initial polygonal models underwent necessary procedures of spatial filtering, buffering, and morphological smoothing, which ultimately ensured the hydromorphological correctness of the contours.

The results of the vector analysis of the series of created masks clearly confirmed the significant spatial dynamics of the river network. A particularly pronounced tendency towards lateral channel migration and an intensification of lateral erosion were detected at control sites during the inter-monitoring period of 2020–2025. The comparative analysis proved that the configuration and continuity of the identified water mirror are a direct function of the hydrological phase: from a state of deep low water with fragmented branches in 2015 to the high-water periods of subsequent years. The proposed reproducible automated GIS approach minimizes the subjectivity of expert assessments and forms a reliable analytical basis for predicting hydroecological risks and developing effective strategies for the sustainable management of fluvial systems.

Key words: Radar sensing, channel transformations, Sentinel-1, SDWI, QGIS.

Надійшла до редколегії 07.03.2026