

С. Ю. ДАНШИНА, К. Д. ПОДРОЖКО

*Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»,  
Харків, Україна***АВТОМАТИЗОВАНИЙ МОНІТОРИНГ БЕРЕГОВОЇ ЕРОЗІЇ РІЧОК ТА  
ОЦІНЮВАННЯ ФАКТОРІВ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ ЗА ДАНИМИ ДЗЗ**

Інтенсивна зміна берега річок під впливом господарської діяльності потребує оперативних методів контролю прибережних зон. Традиційні дослідження гідроморфологічних змін є фрагментарними та витратними. Тому впровадження методів дистанційного моніторингу на основі відкритих супутникових знімків є актуальним. **Предмет дослідження** – процеси моніторингу ерозії річок і виявлення факторів її посилення. **Мета роботи** – підвищення точності визначення динаміки берегової ерозії річок та об'єктивності оцінок антропогенного впливу шляхом автоматизації аналізу даних ДЗЗ для формування управлінських рішень щодо раціонального землекористування. **Завдання дослідження:** обґрунтувати недостатню інформативність традиційного показника ширини русла для оцінювання ерозійних процесів; запропонувати новий метод автоматизованого моніторингу динаміки берегової лінії та розораності заплави; дослідити статистичний зв'язок між інтенсивністю змін берегової лінії та сільськогосподарським освоєнням прибережних територій, підтвердивши практичну ефективність розробленого методу. **Методи дослідження** базуються на використанні системного та функціонального аналізу інформаційних процесів, методів ГС-аналізу, об'єктно-орієнтованого моделювання за допомогою мови UML, а також статистичного аналізу даних. **Отримані результати** полягають у розробленні концептуальної моделі та формалізації структури методу автоматизованого моніторингу берегової лінії. Метод ґрунтується на інтеграції алгоритмів трансектного аналізу та попиксельного дешифрування угідь за супутниковими знімками Sentinel-2, що дає змогу адаптувати процес дослідження заплави до умов обмеженого доступу до території. Запропонований підхід забезпечує аналіз геоморфологічних метрик у просторовому зв'язку із середніми площами розораних земель у межах обстежуваних відрізків. **Практична апробація** методу на тестовій ділянці р. Сіверський Донець підтвердила його працездатність. Зокрема, математично доведено, що 57,5% змін швидкості деформації русла безпосередньо зумовлено рівнем розораності заплави земель, із фіксацією екстремальних ділянок розмиву до 53,1 м. Створені картосхеми забезпечують наочну візуалізацію та оперативне виявлення критичних «червоних зон» руслової ерозії. **Висновок.** Запропонований метод автоматизує виявлення руслових процесів за допомогою ГС-інструментів, що мінімізує суб'єктивізм експертних оцінок щодо гідроморфології річок і вплив людського фактора під час обробки супутникових даних, а також забезпечує перехід від періодичних польових обстежень до безперервного моніторингу. Отримані результати є ефективним практичним інструментом для цифровізації екологічного управління та створення узгоджених національних наборів геопросторових даних про річкові басейни України.

**Ключові слова:** IDEF0-модель; UML-діаграма; дані супутника; модуль DSAS; швидкість ерозії; розораність заплави.

**1. Вступ**

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), як напрям, що стрімко розвивається, все частіше стає незамінним інструментом для вирішення складних завдань сучасного світу. Його інтенсивне залучення до екологічного моніторингу – один з найвдаліших прикладів, що дає змогу відстежувати стан довкілля на значних територіях [1].

Діяльність людини, зокрема видобувна промисловість, виробництво продуктів харчування та енергії, транспорт, урбанізація та надмірне використання ресурсів, швидко трансформують планету. Навіть природоохоронні території не є застрахованими: 114 із 229 об'єктів Всесвітньої спадщини перебувають під

загрозою через антропогенний вплив [1, 2]. Ефективність ДЗЗ у подоланні цих викликів зумовлена стрімким розвитком аерокосмічних технологій, що генерують колосальні обсяги візуальних даних. Сучасні системи забезпечують високу періодичність спостережень, поліпшену просторову роздільну здатність та багатоканальність зображень. Це дає змогу оперативно охоплювати значні площі (що можуть вимірюватися сотнями тисяч гектарів), проводити ретроспективний аналіз на основі архівних даних і здійснювати безпечний моніторинг у важкодоступних зонах. Застосування сучасних датчиків дає змогу виявляти екологічні зміни на ранніх етапах, що часто недоступно для традиційних польових методів дослідження [2, 3].



Моніторинг водних об'єктів, що зазнають руйнівного впливу кліматичних змін, стрімкої урбанізації та прямого антропогенного навантаження, сьогодні є критично актуальним завданням. Гідрологія часто залишається недостатньо вивченою через обмежену доступність об'єктів і малу кількість польових вимірювань, тому технології ДЗЗ стають найефективнішим інструментом для аналізу річкових систем. Вони дають змогу не лише фіксувати поточне забруднення або обміління водойм, а й передбачати майбутні трансформації для прийняття оперативних управлінських рішень. Інтеграція супутникових знімків із геоприв'язаними екологічними даними перетворює розрізнену інформацію на основу для стратегічного планування, що сприяє управлінню в режимі реального часу, дозволяючи фахівцям розробляти стратегії охорони довкілля, які ґрунтуються на фактичних даних. Зокрема, такий підхід є застосовним для моніторингу берегової ерозії: поєднання просторового охоплення й архівних даних дає змогу оцінити зміни берегової лінії, спрогнозувати руйнівні процеси на основі ретроспективного аналізу та сформулювати практичні рекомендації [1, 4].

### 1.1. Мотивація дослідження

Ерозія берегів річок – це процес руйнування берегової лінії та винесення ґрунту водним потоком, що є частиною природної еволюції річки, але часто прискорюється антропогенною діяльністю [5].

Процеси розмиву залежать від складних гідрокліматичних факторів (паводків, зміни режиму опадів), які суттєво загострюються через нерегульовану забудову прибережних смуг, вирубку лісів, зміну русел тощо, порушуючи природний баланс наносів і суттєво прискорюючи відступ берега [5, 6]. Окрім значених факторів, ключову роль у дестабілізації берегової лінії відіграє зміна землекористування в заплавах. Зокрема, розорювання прибережних захисних смуг та інтенсивне сільськогосподарське використання земель поблизу русла призводить до знищення природного рослинного покриву, порушує структуру ґрунту. Це створює серйозну екологічну та економічну загрозу (від втрати родючих земель і руйнування інфраструктури до ризиків для громад, що проживають у прилеглих зонах) і потребує детального кількісного просторового оцінювання зв'язку між змінами землекористування, екологічних показників та динамікою ерозії. Без такої інтегрованої інформації природоохоронні та адаптивні заходи можуть бути розрізненими та неефективними [6, 7].

### 1.2. Сучасний стан

У контексті євроінтеграції законодавство України в сфері оцінки гідроморфології річок активно формується. Зокрема, запропоновано низку регламентів на основі положень Водної рамкової директиви (№ 2000/60/ЄС), що впроваджують метод RHAT (River Hydromorphology Assessment Technique), згідно з яким заповнюють протокол гідроморфологічного обстеження для фіксації актуального стану русел та долин річок. Залучені експерти формують і обробляють ці дані для подальшого аналізу [5, 8]. Традиційно тут застосовують наземні геодезичні обстеження, а для виявлення ранніх ознак розмиву берегів – батиметричну зйомку русла. Незважаючи на високу точність отриманих даних, такі методи потребують значних ресурсів і мають обмежене просторове охоплення (Коноваленко О. [8], Andrade F. A. A. та ін. [9]).

Для подолання цих обмежень пропонується впровадження інформаційних технологій. Наприклад, це передбачено в Операційному плані реалізації у 2025–2027 рр. Водної стратегії України на період до 2050 р. (розпорядження КМУ від 10 грудня 2024 р. № 1238-р). Найпоширенішим інструментом для реалізації цих намірів вважають геоінформаційні системи (ГІС). У наукових працях (наприклад, Hasan J. та ін. [10], J. Deng та ін. [11]) дослідження динаміки річкових русел за допомогою ГІС часто базується на створенні полігонів водного дзеркала за знімком і побудові поперечних перерізів для вимірювання варіацій ширини річки. Це дозволяє оцінити площу дзеркала, визначити морфометричні параметри русла та встановити масштаби ерозії. Проте ці методи суттєво залежать від ручних операцій, що вносить суб'єктивізм і похибки.

Хоча поєднання ДЗЗ і ГІС є ключовим для вирішення подібних завдань, існують суттєві технічні обмеження. Зокрема, геометричні спотворення на супутникових знімках без належної корекції критично впливають на точність фіксації країв берегової лінії. Основним викликом залишається роздільна здатність даних: наприклад, широко вживані знімки Landsat із роздільною здатністю 30 м часто є недостатніми для замірів ширини вузьких ділянок річок, де дрібномасштабні відступи берега не фіксуються. Окрім просторових обмежень, важливо враховувати часову частоту зйомки, щоб уникнути помилкового сприйняття сезонних коливань рівня води як ерозійних процесів [10, 11].

Окремим перспективним напрямом стає використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Наприклад, відомими є дослідження, що продемонстрували ефективність фотограмметрії з використанням БПЛА для аналізу ерозії узбережжя в Греції, Іспанії та арктичних регіонах Канади (Andrade F. A. A.

та ін. [9]). Це підтверджує високу точність методу в районах із динамічними змінами рельєфу, де дрони можуть доповнювати або частково замінювати традиційні вимірювання (Коробов А. Г. та ін. [12], Marcinkowski P. та ін. [13]). Проте використання БПЛА для комплексного моніторингу річкових систем має низку суттєвих обмежень [12, 13]:

- обмежене просторове охоплення: на відміну від супутникових даних, зйомка з дронів зазвичай фокусується на окремих, відносно однорідних ділянках, що не дозволяє охопити цілі річкові басейни;

- складність аналізу різномірних ландшафтів: метод демонструє нижчу ефективність при переході між різними геоморфологічними зонами, такими як лісові масиви, сільськогосподарські угіддя або урбанізовані території, де перешкоди (рослинність, забудова) ускладнюють створення точних моделей берегової лінії;

- залежність від умов зйомки: необхідність безпосередньої присутності оператора на місці та чутливість до погодних умов обмежують можливість регулярного ретроспективного моніторингу.

Для підвищення об'єктивності оцінки та прогнозування ерозійних процесів дедалі частіше використовують DSAS (Digital Shoreline Analysis System) – безкоштовне розширення для ArcGIS, розроблене Геологічною службою США. Цей інструмент дозволяє автоматизувати розрахунки, вимірювати та досліджувати швидкість зміни берегової лінії на основі порівняння її історичних положень, отриманих із супутникових знімків за різні часові періоди [14].

Робота DSAS базується на лінійному методі: від базової лінії (baseline) будують поперечні профілі (трансекти) в бік досліджуваного контуру. У точках їх перетину з лінією одного з берегів відбувається автоматична фіксація координат для оцінювання його зміщення в певний момент часу. Це забезпечує ідентифікацію відступу берегової лінії для розрахунку параметрів ерозії за індексами, що математично відображають динаміку кривизни русла річки, а саме [14, 15]:

- NSM (Net Shoreline Movement) – чисте зміщення берегу як відстань між найдавнішою та найновішою береговими лініями;

- SCE (Shoreline Change Envelope) – огинаюча зміни берега, що відображає максимальну відстань між усіма виявленими положеннями берега незалежно від дати;

- EPR (End Point Rate) – середньорічна швидкість зміщення берегової лінії.

Використання цих параметрів дає змогу не лише кількісно оцінити ерозійні процеси, а й проаналізувати стабільність берегової лінії протягом досліджуваного періоду.

Отже, результати бібліографічного огляду підтверджують, що ефективне проведення моніторингу берегової ерозії, зокрема з використанням методу RHAT, суттєво ускладнюється через велику протяжність річкових систем, обмежену доступність їхніх окремих ділянок, недостатню кількість польових вимірювань та дефіцит ресурсів для проведення наземних обстежень [4, 8, 9]. Традиційні підходи, такі як геодезичні та батиметричні зйомки, а також ручні ГІС-методи, попри свою точність, часто вносять суб'єктивізм і потребують значних часових витрат [9–11]. Навіть використання технологій БПЛА не забезпечує необхідного просторового охоплення для великих територій [13].

Тому для підвищення об'єктивності результатів моніторингу річок оптимальним рішенням стає поєднання даних ДЗЗ з інструментами ГІС, зокрема DSAS, та їх верифікація польовими дослідженнями. Це дає змогу перейти від фрагментарних ручних розрахунків до системного моніторингу динаміки берегової лінії [10, 15].

### 1.3. Мета й завдання дослідження

*Метою статті є підвищення точності визначення динаміки берегової ерозії річок і об'єктивності оцінок антропогенного впливу шляхом автоматизації аналізу даних ДЗЗ для формування управлінських рішень щодо раціонального землекористування.*

*Завдання дослідження:*

- запропонувати метод автоматизованого моніторингу динаміки берегової лінії та розораності заплав на основі ГІС-алгоритмів і даних ДЗЗ;

- дослідити зв'язок між інтенсивністю відступу берега та сільськогосподарським освоєнням заплав, підтвердивши ефективність методу для інформаційної підтримки прийняття управлінських рішень.

## 2. Алгоритмічна структура методу автоматизованого моніторингу

Залежність методу RHAT від експертних суджень і його низька чутливість до динаміки морфологічних змін створюють ризик суб'єктивності та фрагментарності оцінок щодо стану річок [8]. Для подолання цих обмежень пропонується перехід до автоматизованого оперативного моніторингу на основі даних ДЗЗ.

### 2.1. Концептуальна модель процесу моніторингу

Аналізуючи основні інформаційні потоки процесу «Оцінювання стану та гідроморфологічних змін

річок» [8], подамо процес моніторингу річок у вигляді контекстної IDEF0-моделі (рис. 1). Вона узагальнює вимоги методу RHAT і залучає до реалізації процесу сучасні ГІС інструменти.

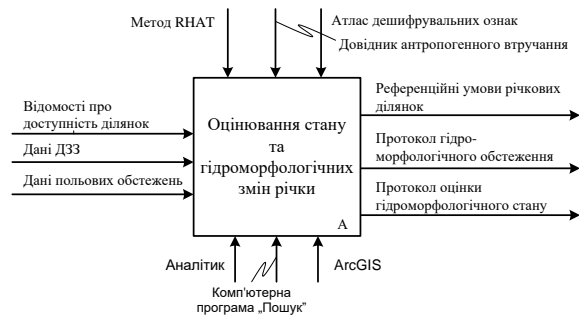


Рис. 1. Контекстна IDEF0-модель процесу «Оцінювання стану та гідроморфологічних змін річок»

Відповідно до методології IDEF0 пояснімо суть моделі через взаємозв'язок її основних потоків [16].

На вхід надходить інформація, зокрема архівні та актуальні космічні знімки, дані польових досліджень, а також відомості про доступність ділянок, що є критичним в умовах воєнного стану.

Процес регламентується відповідно до вимог методу RHAT. Додатково як керівна інформація використовуються атлас дешифрувальних ознак і дані про антропогенне навантаження, які на певних етапах задають логіку обробки даних.

Кінцевим результатом (виходом) моделі є протоколи гідроморфологічного обстеження та оцінки стану, що формуються шляхом порівняння з референційними умовами для конкретних ділянок і стають основою для прийняття управлінських рішень.

Основним механізмом реалізації процесу є програмне забезпечення ArcGIS 10.5, функціональні можливості якого для вирішення спеціалізованих завдань доповнено модулем DSAS і авторською комп'ютерною програмою «Пошук».

## 2.2 Емпіричне обґрунтування вибору діагностичних показників стану русла

Основна ідея методу RHAT полягає у визначенні ступеня відхилення річкової ділянки від її природного (еталонного) стану. При оцінюванні за RHAT складається протокол, де фіксують ключові критерії стану річки, зокрема морфологію русла, стан і характер водної рослинності, структура та стабільність берегів тощо. Ці критерії визначаються експертом безпосередньо під час польових обстежень шляхом візуального аналізу та порівняння з архівними даними. Зокрема, зміна типу русла, збільшення його ширини та інтенсивне розмивання берегових схилів традиційно вважаються індикаторами активних еро-

зійних процесів [8, 13]. При переході до автоматизованого моніторингу важливо перевірити чутливість цих показників до реальних руслових процесів. Для підтвердження гіпотези про низьку інформативність стандартних параметрів (зокрема, ширини річки) проведено дослідження русла річки за допомогою ГІС.

Відповідно до методу RHAT, процес розпочався з поділу річки на сегменти – однорідні річкові ділянки обстеження з певними ознаками (наприклад, ділянку через сільськогосподарські угіддя, лісову ділянку, тощо). Зазвичай довжина ділянки обстеження складає близько 1000 м (конкретне значення залежить від типу річки), а ширина вздовж обох берегів визначається межами прибережної захисної смуги: згідно з Водним кодексом України, для великих річок вона становить 100 м [8].

Як об'єкт дослідження обрано територію русла р. Сіверський Донець біля с. Петрівське Ізюмського району Харківської області загальною площею 1,16 км<sup>2</sup> (рис. 2).



Рис.2. Ділянка обстеження станом на 2025 р.

Для оцінки інформативності показника ширини русла як діагностичної ознаки ерозії було проаналізовано серію космічних знімків за серпень 2015, 2020 та 2025 рр. Вибір саме серпня пов'язаний з необхідністю мінімізації впливу сезонних коливань рівня води для зниження похибки при визначенні межі берегової лінії: після весняного водопілля рівень стабілізується, заплава не затоплена, а льодові явища відсутні.

Далі на обраній території виділено три характерні ділянки русла, що різняться за морфологічними та гідродинамічними характеристиками (рис. 2):

- ділянка № 1 (помаранчевий маркер) – відносно прямолінійний відрізок русла зі стабільними умовами течії та мінімальним впливом бічної ерозії;

- ділянка №2 (жовтий маркер) – меандруюча ділянка з активною взаємодією процесів розмиву зовнішнього берега та акумуляції на внутрішньому, що

потенційно впливає на змінність ширини;

- ділянка №3 (зелений маркер) – сегмент із наявністю акумулятивних форм (піщаних кос, мілин), що відзначається нестабільністю руслових процесів та значною мінливістю ширини в межах дослідження.

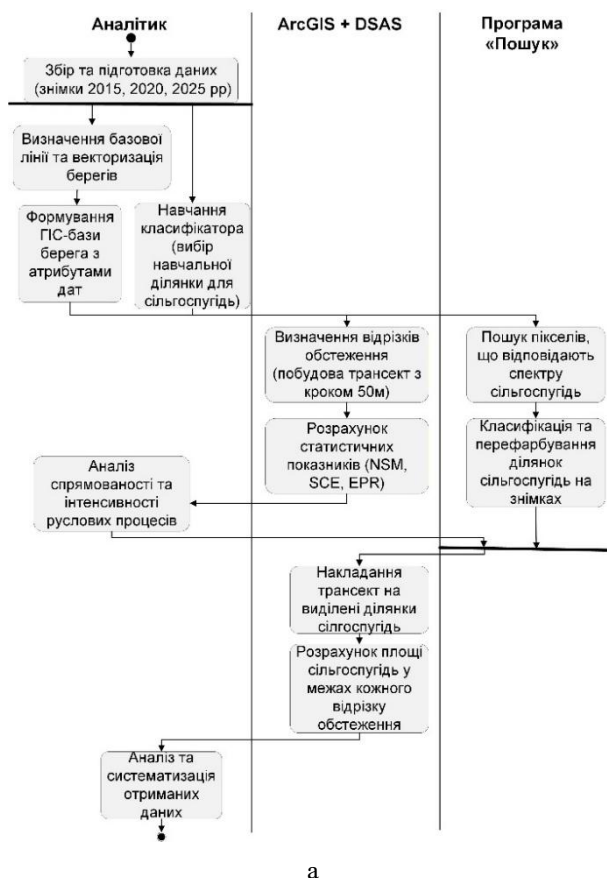
Результати вимірювань ширини русла на обраних тестових ділянках за період 2015-2025 рр. наведено в табл. 1. Вимірювання проводилися в ArcGIS за допомогою інструменту лінійних вимірювань (Measure) за фіксованими поперечними профілями, що позначені на рис. 2. Це дало змогу порівняти ширину річки шляхом точної прив'язки відрізків заміру на кожному з часових зрізів.

Таблиця 1

Динаміка ширини русла р. Сіверський Донець за ділянками

Дата знімку	Ширина русла, м		
	Ділянка № 1	Ділянка № 2	Ділянка № 3
2015	37	45	30
2020	36	21	36
2025	46	24	29

Аналіз табл. 1 показує, що значення ширини русла на різних ділянках змінюються нерівномірно та не мають сталого часового тренду. Наприклад, на ділянці №2 зафіксовано різке звуження русла у 2020 р.



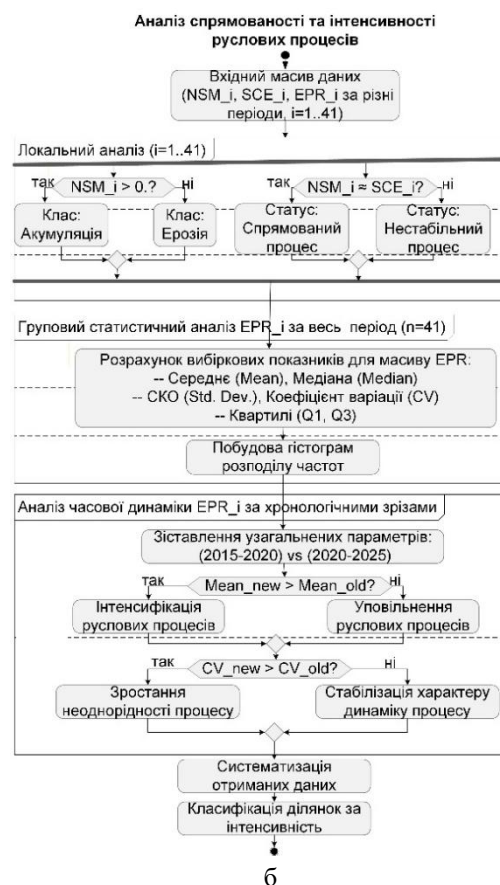
а

(з 45 м до 21 м) з наступним незначним розширенням, тоді як на ділянці №1, навпаки, спостерігається збільшення ширини до 46 м у 2025 р. Такі коливання (варіабельність у межах 10-20 м) обумовлені впливом додаткових факторів, зокрема особливостями гідрологічного режиму та кліматичними умовами, що є наслідком просторово неоднорідного та нелінійного характеру гідроморфологічних змін [6].

Це доводить неможливість використання лише ширини як надійного критерію для автоматизованого моніторингу, адже він виступає лише одним із компонентів, а не визначальним індикатором змін. Зазначене обґрунтовує доцільність переходу до трансектного аналізу динаміки берегових ліній.

### 2.3. Логіко-алгоритмічна структура методу на основі трансектного аналізу

Метод працює в автоматизованому режимі та передбачає виконання низки етапів, взаємозв'язок між якими відображено на UML-діаграмі активностей (рис. 3). Ця діаграма деталізує внутрішню логіку раніше описаної IDEF0-моделі та побудована за допомогою PlantUML (<https://plantuml.online/>).



б

Рис. 3. UML-діаграма активностей, що пояснює взаємодію геоінформаційних модулів та аналітичних процесів під час моніторингу річок: а – загальна структура методу; б – послідовність реалізації етапу аналізу динаміки руслових процесів

*Етап 1.* Збір та підготовка даних.

На цьому етапі відбір супутникових знімків Sentinel-2 за різні роки проводиться для періоду межени (зادля врахування стабільного рівня води) за такими критеріями [17]:

- просторова розрізненість: використання каналів із роздільною здатністю 10-20 м для оптимальної ідентифікації берегових контурів і меж сільськогосподарських угідь;

- хронологічна глибина: формування часового ряду з трьох знімків (наприклад, 2015, 2020, 2025 рр.) з інтервалом у 5 років для нівелювання сезонних аномалій і виявлення стійкої динаміки;

- геометрична корекція: обов'язкова прив'язка до системи координат WGS 84/UTM для забезпечення точності при накладенні контурів різних років;

- якість зображення: корекція атмосферних спотворень і фільтрація хмарності (не більше 10% на ділянці обстеження).

*Етап 2.* Визначення базової лінії та формування ГІС-бази берегових ліній.

На цьому етапі формується просторова та математична основа для подальшого аналізу динаміки русла. Вона реалізується як набір лінійних шарів (Polyline) в єдиній картографічній проекції, що створюються у такій послідовності [14]:

- векторизація берегових контурів (Shorelines) для кожного часового зрізу (2015, 2020, 2025 рр.). Вимогою до топології є безперервність ліній, відсутність самоперетинів і розривів у межах досліджуваної ділянки;

- атрибутування та хронологічна прив'язка шляхом об'єднання векторних ліній у єдиний клас об'єктів (Feature Class). Кожному елементу присвоюється унікальний ідентифікатор (ShorelineID) і обов'язкове поле Date, що дозволяє модулю DSAS автоматизовано розраховувати темпи змін у часі;

- побудова базової лінії (Baseline) шляхом створення безперервної лінії, що проходить паралельно до загального напрямку русла та слугує просторовою точкою відліку, від якої алгоритм генерує перпендикулярні профілі (трансекти) для вимірювання відстані до берегових контурів різних років.

*Етап 3.* Визначення відрізків обстеження та розрахунок показників динаміки.

На цьому етапі за допомогою модуля DSAS в автоматизованому режимі здійснюється побудова вимірювальної мережі та розрахунок статистичних параметрів руслових процесів, зокрема:

- генерація мережі трансект (відрізків обстеження) – на основі базової лінії будується система перпендикулярних профілів, крок між якими встановлюється на рівні 50 м. Такий інтервал пов'язаний із

поняттям відрізка обстеження, довжина якого, відповідно до вимог методу RHAT, залежить від ширини русла та морфологічного типу річки для забезпечення репрезентативності даних [8, 14];

- розрахунок статистичних показників – для кожного відрізка обстеження обчислюють такі параметри NSM, SCE та EPR за формулами [7, 14, 15]:

$$NSP = D_{new} - D_{old}, \quad (1)$$

де  $D_{new}$  та  $D_{old}$  – відстані від базової лінії до берегових ліній (наприклад, у 2025 та 2015 роках відповідно);

$$SCE = D_{max} - D_{min}, \quad (2)$$

де  $D_{max}$  та  $D_{min}$  – максимальна та мінімальна відстані від базової лінії до берега серед усіх знімків відповідно;

$$ERP = \frac{NSP}{t}, \quad (3)$$

де  $t$  – кількість років між початковим і останнім знімками (наприклад, 10 років).

*Етап 4.* Аналіз динаміки руслових процесів.

На цьому етапі аналізують статистичні показники, що характеризують спрямованість та інтенсивність руслових процесів, за алгоритмом, UML-діаграма якого наведена на (рис. 3, б). Отримані результати є основою для висновків щодо зв'язку між динамікою ерозії та змінами землекористування.

*Етап 5.* Автоматизована класифікація об'єктів землекористування.

Паралельно з моделюванням геометрії берега за допомогою програми «Пошук» виконують обробку растрових даних для ідентифікації цільових категорій земель. Цей процес містить такі кроки [18]:

- навчання класифікатора (вибір еталона) – аналітик, базуючись на відомих дешифрувальних ознаках об'єктів, визначає на супутниковому знімку репрезентативну ділянку (навчальну вибірку), що відповідає типовим характеристикам сільгоспугідь (ріллям), для подальшого пошуку;

- спектральний аналіз інтенсивності – програма автоматично визначає статистичні параметри інтенсивності пікселів еталона і розраховує характерний діапазон значень кольорової інтенсивності, що відповідає характеристикам заданого типу поверхні;

- автоматизований пошук та класифікація – на основі визначених характеристик здійснюється пошук пікселів з ідентичною інтенсивністю на всьому знімку з їх подальшим перефарбуванням для відокремлення площ сільгоспугідь від інших об'єктів ландшафту.

Точність виконаної класифікації зіставляється з наявними даними про антропогенне навантаження на досліджуваній території.

*Етап 6.* Розрахунок площі сільгоспугідь у межах відрізків обстеження.

На цьому етапі в середовищі ArcGIS виконується просторовий синтез отриманих даних для кількісної оцінки впливу землекористування на динаміку руслових процесів у такій послідовності:

- просторове накладання (Overlay) – суміщення мережі трансект, сформованої в модулі DSAS, з тематичними растровими шарами програми «Пошук» для локалізації даних про розораність земель у межах кожного відрізка обстеження;

- обчислення площ у зонах впливу – автоматизоване формування буферних зон навколо трансект у межах прибережної захисної смуги з подальшим підрахунком цільових пікселів та їх конвертацією у метричні одиниці;

- формування підсумкової бази даних – інтеграція отриманих значень до атрибутивної таблиці трансект для створення єдиного запису, що поєднує показники динаміки берега (NSM, SCE, EPR) і кількісні дані про площу сільгоспугідь.

*Етап 7.* Загальний аналіз і систематизація даних.

Завершальний етап передбачає статистичне оброблення просторових даних і визначення кореляції між станом русла та антропогенним навантаженням на заплаву.

Отримані дані стають основою для екологічного районування території за протоколом RHAT [8] і вітчизняними нормативами [19] з візуалізацією результатів на картосхемах.

### 3. Апробація методу автоматизованого моніторингу

Практичне застосування запропонованого методу моніторингу продемонстровано на прикладі дослідження ділянки р. Сіверський Донець (поблизу с. Петрівське Ізюмського району Харківської області). При цьому вирішено такі завдання:

- розраховано узагальнені показники, що об'єктивно характеризують динаміку руслових процесів і знайдено площі розораних земель за супутниковими знімками;

- проаналізовано отримані кількісні параметри та запропоновано можливі управлінські рішення.

Згідно етапів методу для аналізу змін берегової лінії відібрано супутникові знімки Sentinel-2 ділянки річки за 8 вересня 2015, 2020 та 2025 рр. Виконано їх геопросторову прив'язку, встановлено базову лінію, сформовано ГІС-базу берегових ліній і згенеровано відрізки обстеження (трансекти) з інтервалом 50 м.

З використанням модуля DSAS за формулами (1) – (3) розраховано статистичні показники деформації берегу (SCE, NSM та EPR). Фрагмент отриманих результатів для окремих відрізків обстеження (трансект) представлено в табл. 2. Результат виконання цих етапів наведено на рис. 4, де додатково наведено розподіл величини відступу берега (за  $|NSM|$ ) залежно від номера трансекти.

Відповідно до етапу 4 методу (рис. 3, б) проаналізовано дані табл. 2.

Постійно від'ємні значення показників NSM на всіх відрізках обстеження вказують на наявні ерозійні процеси берегової зони протягом усього досліджуваного періоду. Повний збіг абсолютних значень NSM із показником SCE доводить монотонний та односпрямований характер цих змін [14]. Протягом 2015–2025 рр. на досліджуваній ділянці р. Сіверський Донець не зафіксовано чергування процесів розмиву та акумуляції – берегова лінія безперервно відступала вглиб суші.

Результати просторового розподілу зміщення берегу на всій довжині досліджуваної ділянки відображено на рис. 4. Тут чітко простежуються локальні екстремуми на трансектах № 20 та № 21, де зафіксовано максимальний розмив у 53,11 м та 44,45 м відповідно.

Таблиця 2

Показники динаміки русла та господарського освоєння ділянки р. Сіверський Донець (фрагмент)

Відрізок (трансекта)	Показники деформації берегу					Середня площа розораних земель, га
	NSM, м	SCE, м	Швидкість відступу берега, EPR, м/рік			
			2015–2025	2015–2020	2020–2025	
1	-9,57	9,57	-0,96	-0,48	-1,44	0,80
2	-8,09	8,09	-0,45	-1,16	-0,81	0,62
3	-11,51	11,51	-0,45	-1,86	-1,15	0,97
...	...	...	...	...	...	...
17	-20,83	20,83	-2,08	-0,52	-3,65	8,52
18	-21,02	21,02	-2,10	-1,04	-3,17	8,79
19	-18,18	18,18	-1,82	-0,70	-2,93	6,12
20	-53,11	53,11	-5,31	-0,33	-10,29	9,67
21	-44,45	44,45	-4,45	-0,45	-8,44	9,62
...	...	...	...	...	...	...
39	-19,79	19,79	-1,98	-1,11	-2,85	8,00
40	-19,30	19,30	-1,93	-1,10	-2,77	7,57
41	-19,11	19,11	-1,91	-1,53	-2,29	0,84

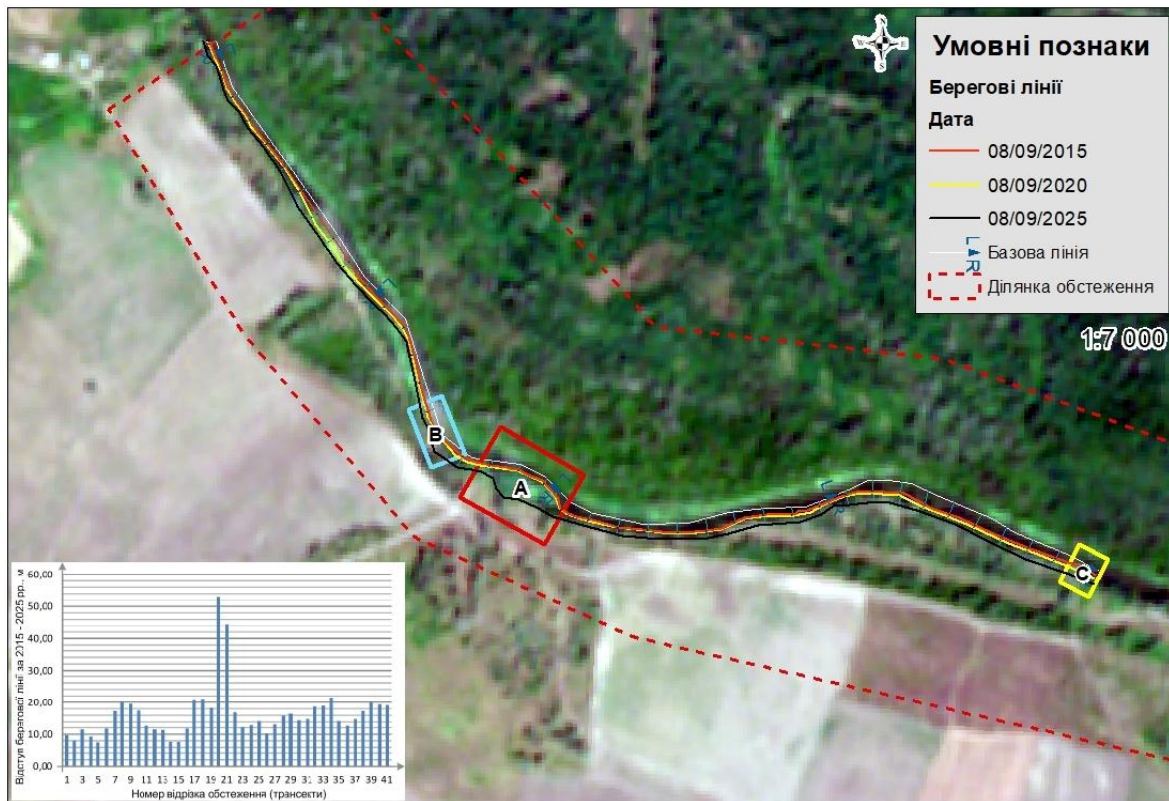


Рис. 4. Результати ГІС-моніторингу деформацій берегової лінії ділянки р. Сівєрський Донець за 2015–2025 рр.

Оцінювання інтенсивності руслових процесів проведено за показником швидкості ерозії (EPR) за десятиріччя. Середня швидкість відступу берега становить  $-1,63$  м/рік із середньоквадратичним відхиленням (СКВ)  $0,85$  м/рік, що свідчить про високу інтенсивність ерозійних процесів [15]. Значення коефіцієнта варіації  $0,52$  вказує на просторову неоднорідність ерозійних процесів уздовж русла, структуру яких ілюструє гістограма розподілу, наведена на рис. 5.

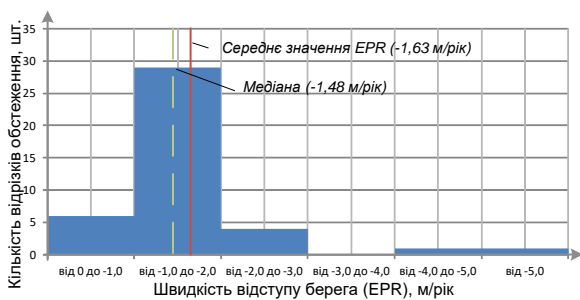


Рис. 5. Гістограма розподілу EPR за 2015–2025 рр.

Гістограма має виражений асиметричний характер: більшість значень швидкості ерозії зосереджено в інтервалі від  $-1,0$  до  $-2,0$  м/рік (29 трансект). Водно-

час праворуч спостерігається довгий «хвіст» поодиноких значень у діапазоні від  $-4,0$  до понад  $-5,0$  м/рік (2 трансекти). Саме ці ділянки зміщують середнє арифметичне значення праворуч і збільшують СКО.

Те, що медіана ( $-1,48$  м/рік) за модулем менша за середнє значення ( $-1,63$  м/рік), підтверджує правосторонню асиметрію розподілу, а також наявність локальних процесів інтенсивного руйнування берега. Отже, високий коефіцієнт варіації сформувався під впливом цих екстремальних точок інтенсивного руйнування берегу, а не через загальний хаотичний розкид усього масиву значень EPR. При цьому на половині відрізків обстеження швидкість відступу берегової лінії є меншою за медіанне значення.

Для візуалізації та просторової інтерпретації отриманих даних ділянки берегової лінії було класифіковано відповідно до категорій міжнародного протоколу RHAT залежно від значень швидкості ерозії. На основі EPR кожен ділянку віднесено до відповідної зони інтенсивності ерозії: помірної (до  $-1,0$  м/рік), високої (від  $-1,0$  до  $-2,0$  м/рік), дуже високої (від  $-2,0$  до  $-5,0$  м/рік) і екстремальної (понад  $-5,0$  м/рік) [8]. Результати просторового розподілу на всій довжині досліджуваної ділянки наведено на рис. 6.

На карті (рис. 6) чітко простежуються локальні екстремуми. До зони екстремального та дуже високого розмиву увійшли трансекти № 20 та № 21, де швидкість ерозії становить  $-5,31$  м/рік та  $-4,45$  м/рік відповідно. У межах зони дуже високої ерозії локалізовано трансекти № 17, № 18 та № 34 із показниками  $-2,08$ ,  $-2,10$  та  $-2,14$  м/рік відповідно.

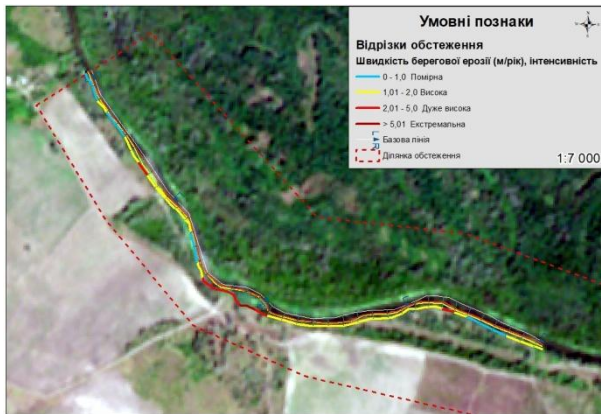


Рис. 6. Класифікація відрізків обстеження р. Сіверський Донець за рівнями берегової ерозії згідно з протоколом РНАТ

Подальший порівняльний аналіз руслових процесів за п'ятирічними періодами (2015–2020 рр. і 2020–2025 рр.) показав таке.

У 2015–2020 рр. спостерігався помірний розмив берегів із середньою швидкістю  $-0,73$  м/рік і медіанним значенням  $-0,52$  м/рік (СКО –  $0,51$  м/рік). Проте у 2020–2025 рр. зафіксовано різке прискорення ерозійних процесів: середнє значення ЕРР зросло майже в 3,5 рази – до  $-2,54$  м/рік, а медіана досягла  $-2,29$  м/рік за істотного збільшення абсолютного розкиду даних (СКО –  $1,72$  м/рік).

Попри значну зміну абсолютних швидкостей, відносна просторова мінливість процесу залишилася незмінною: коефіцієнт варіації для обох періодів є майже ідентичним ( $0,69$  порівняно з  $0,68$ ). Це свідчить про стабільність просторової структури чинників деформації русла або антропогенного тиску на прибережні зони в 2020–2025 рр.

Для підтвердження гіпотези щодо впливу господарської діяльності на прискорення ерозійних процесів проаналізовано динаміку рівня розораності прибережних територій [7, 15]. Для цього, відповідно до наступних етапів методу, на супутникових знімках ідентифіковано сільськогосподарські угіддя та розраховано їх площу в межах відрізків обстеження на всій довжині досліджуваної ділянки. Результати виконання цих етапів наведено в останньому стовпчику табл. 2.

Зіставлення отриманих даних щодо площ госпо-

дарського освоєння та значень ЕРР для кожного відрізка обстеження дало змогу відокремити такі ділянки (рис. 4):

- ділянка А (трансекти № 20 і № 21), де зафіксовано максимальний розмив і максимальну площу розораних земель –  $9,67$  га та  $9,62$  га відповідно;
- ділянка В (трансекти № 17 і № 18), де зафіксовано значну площу розораних земель –  $8,52$  га та  $8,79$  га відповідно за дуже високої швидкості ерозії на рівні близько  $2,10$  м/рік;
- ділянка С (трансекта № 41), де зафіксовано незначну площу розораних земель ( $0,84$  га) за швидкості ерозії, близької до дуже високої ( $1,91$  м/рік).

Ці неоднозначні результати призвели до необхідності оцінювання щільності зв'язку між інтенсивністю відступу берега та сільськогосподарським освоєнням заплави.

Результати кореляційного аналізу (рис. 7) показують наявність сильного зворотного зв'язку між досліджуваними параметрами з коефіцієнтом кореляції  $r = -0,758$ . Знак «мінус» підтверджує той факт, що збільшення площі господарського освоєння прибережних територій призводить до зростання швидкості відступу берегової лінії.

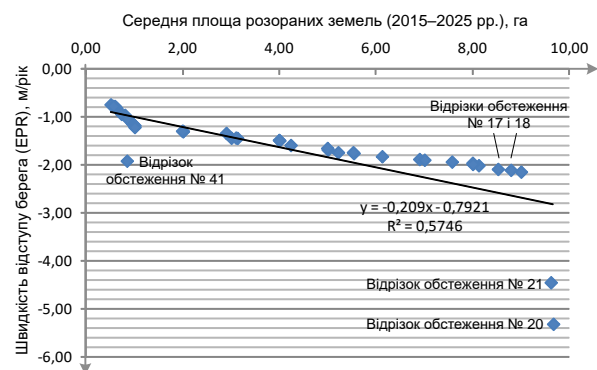


Рис. 7. Залежність швидкості відступу берега від площі розораних земель (діаграма розсіювання)

Для математичної формалізації та просторового моделювання виявленого зв'язку було побудовано діаграму розсіювання з розрахунком параметрів регресійної залежності (рис. 7), що описується лінійним рівнянням:

$$y = 0,209x - 0,7921, \quad (4)$$

де  $y$  – швидкість ерозії берега (ЕРР), м/рік;

$x$  – середня площа розораних земель у межах трансекти, га.

У рівнянні (4) коефіцієнт регресії ( $-0,209$ ) показує, що розширення площі сільськогосподарських угідь у межах однієї трансекти на  $1$  га призводить до додаткового відступу берегової лінії приблизно на  $0,21$  м/рік. Вільний член рівняння ( $-0,7921$  м/рік) характеризує умовну базову швидкість відступу берега,

зумовлену виключно природними чинниками за відсутності антропогенного тиску на заплаву.

Коефіцієнт детермінації ( $R^2 = 0,5746$ ) свідчить про те, що 57,5 % усіх змін у швидкості розмиву берега на ділянці р. Сіверський Донець зумовлено саме рівнем розораності заплавних земель. Отже, антропогенне навантаження є основним чинником прискорення руслових процесів на цій території, тоді як решта (42,5 %) змін припадає на природні гідрологічні та геоморфологічні чинники.

Для комплексного оцінювання екологічного стану прибережних територій, окрім оцінки морфодинаміки річки за протоколом RHAT, проведено районування досліджуваної ділянки відповідно до вітчизняних нормативних вимог, а саме «Методичних рекомендацій щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод» [19].

Оцінювання виконано шляхом адаптації стандартного показника частки сільськогосподарських угідь  $I_{сг}$  до просторових меж відрізків обстеження за формулою

$$I_{сг} = \frac{S_{сг}}{S_{тр}}, \quad (5)$$

де  $S_{сг}$  – середня площа розораних земель у межах трансекти, га;

$S_{тр}$  – загальна площа заплави в межах відповідного відрізка обстеження, га.

На основі розрахованих значень  $I_{сг}$  кожен відрізок обстеження віднесено до відповідної категорії екологічного ризику внаслідок антропогенного навантаження: «без ризику» – за  $I_{сг} \leq 0,1$  (частка розораних земель менше або дорівнює 10 %); «можливо під ризиком» – за  $0,1 < I_{сг} \leq 0,3$  (від 10 % до 30 %); «під ризиком» – за  $I_{сг} > 0,3$  (понад 30 %) [19]. Результати цього аналізу представлено на рис. 8.

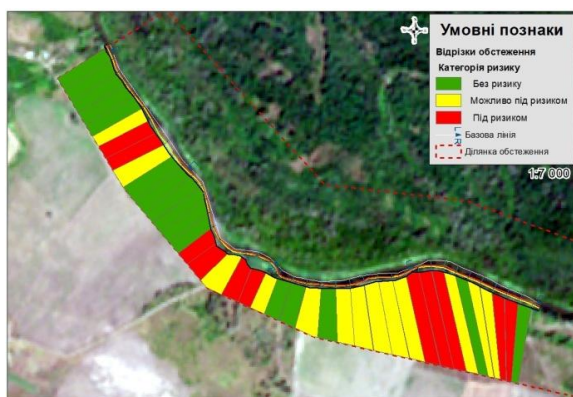


Рис. 8. Класифікація відрізків обстеження р. Сіверський Донець за категоріями екологічного ризику

Згідно з Водним кодексом України у межах прибережних смуг діє режим обмеження господарської діяльності. Тому отримані результати моніторингу є основою для прийняття ґрунтовних управлінських рішень. Зокрема органам місцевого самоврядування та екологічного контролю рекомендовано такі заходи:

1. Оптимізація землекористування (ділянки А та В на рис. 4): розраховані параметри регресії вказують на необхідність припинення розорювання земель у межах трансект № 17, 18, 20 та 21. Тут зафіксовано критичну площу розораності (від 8,52 до 9,67 га), тому зниження антропогенного навантаження надасть змогу зменшити швидкість ерозії з критичних (-5,31 м/рік) до розрахованого базового рівня (-0,79 м/рік).

2. Масштабування розробленого методу автоматизованого моніторингу: моніторинг на основі даних Sentinel-2 доцільно інтегрувати як програмний модуль у регіональні геоінформаційні системи Харківської області. При цьому зони, які ГІС-модель визначила як зони «під ризиком» (рис. 8), потребують верифікації за допомогою БПЛА двічі на рік (після весняного та осіннього підйому води, згідно рекомендацій [9]).

3. Локалізація критичних зон для інженерного втручання: трансектний аналіз часових рядів показав, що на ділянках № 20 та № 21 берег за 10 років відступив на 44–53 метри. Отже, тут потрібне залучення інженерних методів укріплення берега.

## 4. Висновки

У роботі обґрунтовано перехід від традиційних методів гідроморфологічних досліджень до системного використання даних ДЗЗ для спільного аналізу деформацій русла та антропогенного навантаження. Використання відкритих супутникових знімків Sentinel-2 для безперервного моніторингу дає змогу відмовитися від витратних фрагментарних польових досліджень, що є критично важливим в умовах обмеженого фінансування.

Наукова новизна результатів полягає в подоланні ізолюваності ГІС-задач детектування берегової лінії та дешифрування угідь. Запропоновано метод скрізного аналізу, відповідно до якого геоморфологічні параметри (EPR, NSM, SCE) розраховуються в просторовій ув'язці із середніми площами сільськогосподарських угідь у межах спільних трансект. Такий підхід дав змогу формалізувати процес виявлення кореляційних зв'язків між динамікою зміни берегів та інтенсивністю використання земель у межах заплави, підвищивши об'єктивність оцінок порівняно з традиційними морфометричними підходами.

Практична апробація методу на тестовій ділянці р. Сіверський Донець (2015–2025 рр.) підтвердила його ефективність. Зокрема, математично доведено, що 57,5% змін швидкості деформації русла безпосередньо зумовлено рівнем розораності заплавної землі, із фіксацією екстремального розмиву до 53,1 м. Розроблені картосхеми за протоколом RHAT та вітчизняними методичними рекомендаціями Держводагентства дають змогу природоохоронним органам оперативно ідентифікувати «червоні зони» – критичні ділянки ерозії берегової лінії.

Результати дослідження можуть стати додатковим інструментом просування концепції цифровізації екологічного моніторингу шляхом створення узгоджених наборів геопросторових даних про річкові басейни України.

**Внесок авторів:** Огляд та аналіз літератури – **К. Д. Подорожко**; формування завдань і розробка концептуальних положень дослідження – **С. Ю. Даншина**; практична апробація результатів статті – **К. Д. Подорожко**; аналіз результатів дослідження – **С. Ю. Даншина, К. Д. Подорожко**; адміністрування проекту – **С. Ю. Даншина**.

#### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського або іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

#### Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

#### Доступність даних

Набір даних Sentinel-2 L2A Multitemporal True Color Dataset, використаний у цьому дослідженні, можна отримати з порталу Copernicus Browser (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). Зверніть увагу, що для завантаження даних для наукового, освітнього та прикладного використання потрібна реєстрація користувача.

#### Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

## Література

1. Binci, D. *Earth observation and sustainable development: A systematic literature review and content analysis about the New Space Economy* / D. Binci // *Environmental Innovation and Societal Transitions*. – 2026. – Vol. 59. – P. 101088. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2025.101088>.

2. *Live Monitoring of Earth Surface (LiMES): A framework for monitoring environmental changes from Earth Observations* / G. Giuliani, H. Dao, A. De Bono et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Vol. 202. – P. 222-233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.040>.

3. Коваленко, Б. В. Використання візуальних метрик для аналізу стиснення з втратами зашумлених зображень / Б. В. Коваленко, В. В. Лукін // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2021. – № 6 (176). – С. 83-91. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2021.6.09>.

4. *Evaluating Earth observation products for Catchment-Scale operational flood monitoring and risk management in a sparsely gauged to ungauged river basin in Nigeria* / D. Idowu, B. G. Peter, J. Boakye et al. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2025. – Vol. 138. – 16 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104445>.

5. *Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні в 2019 р.* – Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Nats.-dop.-pro-stan-navk.-pyrodnogo-seredovyshha-v-Ukrayini-u-2019-rotsi.pdf>. – (дата звернення: 27.11.2025). – Назва з екрана.

6. *Integrated remote sensing and multi-criteria evaluation to assess coastal ecosystem degradation under climate and human pressures: Insights from Bangladesh* / M. F. Hassan, R. Mahmood, N. M. R. Nasher et al. // *Environmental Challenges*. – 2026. – Vol. 22. – 25 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101403>.

7. *Decoding Chambal River Shoreline Transformations: A Comprehensive Analysis Using Remote Sensing, GIS, and DSAS* / S. Singh, G. Meraj, P. Kumar et al. // *Water*. – 2023. – Vol. 15, iss. 9. – 20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15091793>.

8. Коноваленко, О. Гідроморфологічна оцінка річок. Available at: [https://www.euwipluseast.eu/images/2019/08/PDF/EUWI\\_Konovalenko\\_hydromorphological\\_assessment.pdf](https://www.euwipluseast.eu/images/2019/08/PDF/EUWI_Konovalenko_hydromorphological_assessment.pdf). – (дата звернення: 17.10.2025). – Назва з екрана.

9. *Andrade, F. A. A. Portugal coastal erosion monitoring system using unmanned aerial vehicles and aerial photogrammetry* / F. A. A. Andrade, P. Brasil, M. Lima // *Sustainable Geosciences: People, Planet and Prosperity*. – 2025. – Vol. 1. – 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susgeo.2025.100007>.

10. Hasan J. *Assessing spatiotemporal trends*

of riverbank erosion using a GIS-DSAS-based integrated approach / J. Hasan, Md. A. U. Zaman, M. I. Faridatul // *Geology, Ecology, and Landscapes*. – 2026. – Vol. 10, iss. 1. – P. 331-349. DOI: <https://doi.org/10.1080/24749508.2025.2451450>

11. Thresholds of bank collapse in the Middle and Lower Yangtze River: A framework for early bank collapse warning using multi-source remote sensing / J. Deng, K. Chen, Z. Liet al. // *Journal of Hydrology: Regional Studies*. – 2026. – Vol. 64. – 18 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2026.103189>

12. Метод підвищення робастності нейромереж для співставлення аерознімків / А. Г. Коробов, Ю. В. Москаленко, М. О. Виноградов, В. Ю. Бабич // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2025. – № 5 (207). – С. 76-87. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.5.07>

13. Take a photo of the river! Assessing the feasibility of using Google Street View images as source materials for assessing river hydromorphology / P. Marcinkowski, M. Gielczewski, S. Jusik et al. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2025. – Vol. 145. – 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104972>

14. Digital Shoreline Analysis System version 6.1: U.S. Geological Survey software release / R. E. Henderson, A. S. Farris, M. G. Kratzmann et al. / Reston, 2026. – Access mode: <https://code.usgs.gov/ech/dsas/-/tree/v6.1>. (accessed 08 January 2026). DOI: <https://doi.org/10.5066/P1NHMJNC>

15. Quantifying the riverbank erosion and accretion rate using DSAS model study from the lower Ganga River, India / Md Hasanuzzaman, A. Islam, B. Bera, P. K. Shit // *Natural Hazards Research*. – 2024. – Vol. 4, iss. 4. – P. 550-561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.12.015>

16. Данишина С. Ю. Інформаційна технологія оцінювання антропогенного навантаження на водні об'єкти / С. Ю. Данишина, К. Д. Подорожко // *Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології*. – 2025. – № 106. – С. 170-184. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.11>

17. Performance study of imageries from MODIS, Landsat 8 and Sentinel-2 on measuring shoreline change at a regional scale / D. S. Sunny, K. M. A. Islam, Md. R. A. Mullick, J. T. Ellis // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. – 2022. – Vol. 28. – P. 100-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100816>

18. Podorozhko, K. D. Determination of agricultural land illegal use according to remote sensing data / K. D. Podorozhko // *Environmental Safety of the State: Proceeding of XVII Pan-Ukrainian Scient.-Pract. Conf. of Young Scientists and Students, Kyiv, April 18, 2024*. – Kyiv, 2024. – P. 79 – 81. DOI: <https://doi.org/10.18372/>

2786-8168.18.18560.

19. Методичні рекомендації щодо визначення основних антропогенних навантажень та їхніх впливів на стан поверхневих вод / С. Вихрист, К. Мудра, Е. Осійський та ін. – К. : Держводагентство, 2018. – 21 с.

## Reference

1. Binci D. Earth observation and sustainable development: A systematic literature review and content analysis about the New Space Economy. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 2026, vol. 59. P. 101088. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2025.101088>

2. Giuliani, G., Dao, H., De Bono, A., Chateaux, B., Allenbach, K., De Laborie, P., Rodila, D., Alexandris, N., Peduzzi, P. Live Monitoring of Earth Surface (LiMES): A framework for monitoring environmental changes from Earth Observations. *Remote Sensing of Environment*, 2017, vol. 202, pp. 222-233. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.05.040>

3. Kovalenko, B., Lukin, V. Vykorystannia vizualnykh metryk dlia analizu stysnennia z vratamy zashumlenykh zobrazhen [Using visual metrics to analyze lossy compression of noisy images]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 6 (176), pp. 83-91. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2021.6.09>. (In Ukrainian).

4. Idowu, D., Peter, B. G., Boakye, J., Cohen, S., Carter, E. Evaluating Earth observation products for Catchment-Scale operational flood monitoring and risk management in a sparsely gauged to ungauged river basin in Nigeria. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, vol. 138. 16 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104445>

5. *Natsionalna dopovid pro stan navkolysnnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini v 2019 r.* [National report on the state of the environment in Ukraine in 2019]. Available at: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Nats.-dop.-pro-stan-navk.-pryrodnoho-seredovyshha-v-Ukrayini-u-2019-rotsi.pdf>. (accessed 27.11.2025) (In Ukrainian).

6. Hassan, M. F., Mahmood, R., Nasher, N. M. R., Das, S., Akter, U., Kona, N. Integrated remote sensing and multi-criteria evaluation to assess coastal ecosystem degradation under climate and human pressures: Insights from Bangladesh. *Environmental Challenges*, 2026, vol. 22. 25 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101403>

7. Singh, S., Meraj, G., Kumar, P., Singh, S. K., Kanga, S., Johnson, B. A., Prajapat, D. K., Debnath, J., Sahariah, D. Decoding Chambal River Shoreline Transformations: A Comprehensive Analysis Using Remote Sensing, GIS, and DSAS. *Water*, 2023, vol. 15, iss. 9. 20 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15091793>

8. Konovalenko, O. *Hidromorfolohichna otsinka richok* [Hydromorphological assessment of rivers]. Available at: [https://www.euwipluseast.eu/images/2019/08/PDF/EUWI\\_Konovalenko\\_hydromorphologica\\_l\\_assessment.pdf](https://www.euwipluseast.eu/images/2019/08/PDF/EUWI_Konovalenko_hydromorphologica_l_assessment.pdf). (accessed 17.10.2025) (In Ukrainian).
9. Andrade, F. A. A., Brasil, P., Lima, M. Portugal coastal erosion monitoring system using unmanned aerial vehicles and aerial photogrammetry. *Sustainable Geosciences: People, Planet and Prosperity*, 2025, vol. 1. 8 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susgeo.2025.100007>.
10. Hasan, J., Zaman, Md. A. U., Faridatul, M. I. Assessing spatiotemporal trends of riverbank erosion using a GIS-DSAS-based integrated approach. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2026, vol. 10, iss. 1, pp. 331-349. DOI: <https://doi.org/10.1080/24749508.2025.2451450>
11. Deng, J., Chen, K., Li, Z., Yuan, J., Zhu, L. Thresholds of bank collapse in the Middle and Lower Yangtze River: A framework for early bank collapse warning using multi-source remote sensing. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2026, vol. 10, iss. 1, pp. 331-349. DOI: <https://doi.org/10.1080/24749508.2025.2451450>
12. Korobov, A., Moskalenko, Y., Vynohradov, M., Babych, V. Metod pidvyshchennia robastnosti neiromerezh dlia spivstavlennia aerezonimkiv [A method for improving the robustness of neural network for aerial image matching]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2025, no 5 (207), pp. 76-87. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.5.07>.
13. Marcinkowski, P., Giełczewski, M., Jusik, S., Zieliński, P., Gebler, D., Szoszkiewicz, K., Grygoruk, M. Take a photo of the river! Assessing the feasibility of using Google Street View images as source materials for assessing river hydromorphology. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, vol. 145. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104972>.
14. Henderson, R. E., Farris, A. S., Kratzmann, M. G., Bartlett, M. K., Ergul, A., McAndrews, J., Cibaj, R., Zichichi, J. L., Himmelstoss, E. A., Thieler, E. R. Digital Shoreline Analysis System version 6.1: U.S. Geological Survey software release. Available at: [usgs.gov](https://usgs.gov) (Accessed: 3 January 2026). DOI: <https://doi.org/10.5066/P1NHMJNC>.
15. Hasanuzzaman, M., Islam, A., Bera, B., Kumar Shit P. Quantifying the riverbank erosion and accretion rate using DSAS model study from the lower Ganga River, India. *Natural Hazards Research*, 2024, vol. 4, iss. 4, pp. 550-561. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.12.015>.
16. Danshyna, S., Podorozhko, K. Informatsiina tekhnolohiia otsiniuvannia antropohennoho navantazhennia na vodni obiekty [Information technology for assessing anthropogenic pressure on water bodies]. *Vidkryti informatsiini ta kompiuterni intehrovani tekhnologii – Open Information and Computer Integrated Technologies*, 2025, no. 106, pp. 170-184. DOI: <https://doi.org/10.32620/oikit.2025.106.11> (In Ukrainian).
17. Sunny, D. S., Islam, K. M. A., Mullick, Md. R. A., Ellis, J. T. Performance study of imageries from MODIS, Landsat 8 and Sentinel-2 on measuring shoreline change at a regional scale. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2022, vol. 28, pp. 100-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100816>.
18. Podorozhko, K. D. Determination of agricultural land illegal use according to remote sensing data. *Environmental Safety of the State: Proceeding of XVII Pan-Ukrainian Scient.-Pract. Conf. of Young Scientists and Students, Kyiv, April 18, 2024. Kyiv, 2024*, pp. 79-81. DOI: <https://doi.org/10.18372/2786-8168.18.18560>
19. Vykhryst, S., Mudra, K., Osiiskyi, E., Skoblei, M. Yaroshevyh, O. (comps.) *Metodychni rekomendatsii shchodo vyznacennia osnovnykh antropohennykh navantazhen ta yikhnikh vplyviv na stan poverkhnivykh vod* [Methodological recommendations for determining the main anthropogenic loads and their impacts on the state of surface waters]. Kyiv, Derzhvodagentstvo, 2018. 21 p.

*Надійшла до редакції 17.05.2026, отримано у доопрацьованому вигляді 09.06.2026*

*Дата ухвалення 15.06.2026, дата публікації 17.06.2026*

## AUTOMATED MONITORING OF RIVERBANK EROSION AND ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC IMPACTS USING REMOTE SENSING DATA

*Svitlana Danshyna, Kateryna Podorozhko*

The intensification of river deformation due to human activities necessitates the implementation of operational monitoring methods for riparian zones. Traditional hydromorphological surveys are fragmented and costly, making it imperative to transition to automated monitoring technologies based on open Earth remote sensing data. **The study examines** the processes of monitoring river erosion and identifying factors contributing to its intensification. **The purpose** of the article is to improve the accuracy of determining the dynamics of riverbank erosion and the objectivity

of assessments of anthropogenic impact by automating the analysis of ES data to inform management decisions regarding rational land use. **Research objectives:** to justify the insufficient informativeness of the traditional channel width indicator for assessing erosion processes; to propose a new method for automated monitoring of shoreline dynamics and the extent of floodplain plowing; to investigate the statistical relationship between the intensity of shoreline changes and agricultural land use in riparian areas, thereby confirming the practical effectiveness of the developed method. The research methods are based on systems and functional analysis of information processes, GIS analysis, object-oriented modeling using UML, and statistical, correlation, and regression analyses. The **results** include the development of a conceptual model and the formalization of the automated shoreline monitoring method's structure. The method integrates transect analysis algorithms with pixel-level land-cover classification using Sentinel-2 satellite imagery, enabling adaptation of floodplain research to conditions of limited field access. The proposed approach allows for analyzing geomorphological metrics in spatial connection with the average areas of plowed land within the surveyed segments. **Practical validation** of the method on a test site along the Siverskyi Donets River confirmed its feasibility. In particular, it was mathematically proven that 57.5% of the variance in channel deformation rates is directly attributable to the level of floodplain plowing, with extreme erosion reaching up to 53.1 m. The created thematic maps provide a clear visualization and rapid identification of critical “red zones” of channel erosion. **Conclusions.** The proposed method automates channel-process detection using GIS tools, minimizing subjective expert assessments in river hydromorphology and human error during satellite data processing, while enabling a transition from periodic field surveys to continuous monitoring. The obtained results serve as an effective practical tool for digitalizing environmental management and creating harmonized national geospatial datasets for Ukraine's river basins.

**Keywords:** IDEF0-model; UML diagram; Sentinel-2 data; DSAS module; erosion rate; floodplain plowing.

**Даншина Світлана Юрївна** – д-р техн. наук, проф. каф. геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Подорожко Катерина Дмитрівна** – аспірантка, асистент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Svitlana Danshyna** – Doctor of Technical Science, Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, National Aerospace University “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: s.danshyna@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7354-4146; Scopus Author ID: 57808426700.

**Kateryna Podorozhko** – Postgraduate Student, Assistant at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,  
e-mail: k.d.buriak@khai.edu, ORCID: 0009-0000-9619-7650.