

## ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 504.05; 502.58:556.166: 532.5:528

**Я.В. ХОДНЕВИЧ, Д.В. СТЕФАНИШИН, В.М. КОРБУТЯК**

### **ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ВИНИКНЕННЯ МІСЦЕВИХ РОЗМИВІВ РУСЕЛ РІК**

***Анотація.** Запропоновано підхід до прогнозування місцевих розмивів русел та берегів рік на основі імітаційного комп'ютерного моделювання, який ґрунтується на ідеї синтезу результатів геоінформаційного аналізу, морфологічних, гідрологічних і гідравлічних досліджень та чисельного математичного моделювання кінематики місцевих розвинутих турбулентних течій за русловими утвореннями. Підхід дозволяє виявляти потенційно небезпечні ділянки рік, де можлива інтенсифікація місцевої руслової і берегової ерозії в залежності від основних гідроморфологічних характеристик русла ріки та типу руслового процесу. Показано, що при математичному моделюванні кінематичних характеристик місцевих турбулентних течій за русловими утвореннями можуть використовуватися дані дистанційного зондування Землі та геопросторового аналізу. Математичне моделювання кінематичних характеристик потоку здійснюється в межах тривимірної моделі з використанням рівнянь Рейнольдса.*

***Ключові слова:** геопросторовий аналіз, дистанційне зондування Землі, імітаційне моделювання, інтелектуальна задача, місцеві руслові деформації, рівняння Рейнольдса, прогнозування, русловий процес.*

#### **Вступ**

Натурні спостереження за русловим процесом на малих і середніх ріках показують, що при паводках в місцях розташування в руслах різного роду перешкод, які відхиляються від берега вниз за течією (дерев, що падають в русла, гряд наносів тощо), спостерігаються місцеві розмиви dna і берегів рік (рис. 1, 2), інколи – з тяжкими наслідками. Існують численні випадки берегової ерозії за такими утвореннями, в тому числі з руйнуванням дорожньої інфраструктури, рекреаційних та інших об'єктів народного господарства. Наприклад, в м. Надвірна під час вересневої повені 2007 р. в парковій зоні внаслідок місцевої ерозії за деревами, що впали в русло, було розмито берег р. Бистриця Надвірнянська на ділянці протяжністю 150 м на ширину до 15 м

(рис. 3). На Західному Бузі у Волинській області в місцях стиснення русла за природними русловими утвореннями в результаті берегової ерозії роками відбувається зміна державного кордону України з втратою території [1].



Рис. 1 – Мезоформи в руслі р. Дністер біля с. Довге (Івано-Франківська обл.) зі слідами берегової ерозії (знімок з Google Earth)



а)



б)

Рис. 2 – Приклади місцевого розмиву берегів рік у Рівненській області:  
а) за деревом, що впало в русло ріки (р. Горинь, с. Шубків);  
б) за грядою наносів (р. Случ, с. Маринин)



Рис. 3 – Берегова ерозія на р. Бистриця Надвірнянська в м. Надвірна (Івано-Франківська обл.) (з <http://pravda.if.ua/news-491.html>)

Проведені О.С. Щодро [2-4] лабораторні дослідження показують, що стиснення русла перешкодами не лише призводить до збільшення середніх швидкостей транзитного потоку в живих перерізах. За певних умов за русловими перешкодами, які орієнтовані природним чином, можуть виникати потужні місцеві гвинтоподібні турбулентні течії, які провокують переміщення наносів у напрямку від берега й створюють умови для інтенсифікації місцевого розмиву. В результаті на відповідних ділянках при проходженні паводків руслові переформування нерідко набувають катастрофічного характеру.

Прогнозування місцевих розмивів русел рік є складною задачею. Її рішення неможливе без використання знань з різних предметних областей, таких, наприклад, як гідрологія (стік води, руслові процеси), гідравліка (рух води у відкритих руслах, гідродинаміка), інженерна геологія і механіка ґрунтів, фізичне моделювання водних потоків та теорія подібності, прикладна математика (рівняння математичної фізики, чисельне і комп'ютерне моделювання, розв'язання прямих і обернених задач), інтелектуальний аналіз даних, геоінформатика (дистанційне зондування Землі, ДЗЗ), системний аналіз тощо. Подібні задачі прийнято називати інтелектуальними. Вони важко формалізуються, характеризуються неповнотою, неточністю і суперечливістю даних і знань, великою розмірністю простору рішень, нечіткістю цілей і критеріїв тощо. Класичні підходи до їх розв'язання можуть призводити до створення занадто складних математичних моделей, які важко забезпечити необхідними вхідними даними, точність яких відповідала б можливостям цих моделей [5]. Тому успіх в їх розв'язанні лежить в умінні, залежно від ситуації, використовувати різну інформацію, різні підходи та моделі, застосовувати різні алгоритми, критерії та принципи.

Одним з підходів до розв'язання подібних задач може бути імітаційне комп'ютерне моделювання. При такій постановці задача прогнозування місцевих розмивів русла і берегів ріки може зводитися до математичного моделювання умов виникнення розмивів за донними перешкодами з використанням накопиченої інформації як щодо загальних закономірностей перебігу руслового процесу на вибраній ділянці, так і актуальних геопросторових даних щодо особливостей гідроморфології русла, параметрів руслових утворень, які примикають до берегів тощо. Це дозволить поєднати можливості різних галузей знань, різних підходів і методів з метою отримання результатів з достатньою для прийняття практичних рішень точністю.

Оскільки геопросторові дані змінюються в просторі і часі, то важливим їх джерелом для розв'язання поставленої задачі може стати супутникове знімання. Наразі існують численні архіви супутникових знімків з вільним доступом, серед яких слід відзначити бібліотеки знімків програми Європейського космічного агентства (ESA) (ці супутники забезпечують роздільність від 10 м). Після попередньої реєстрації потрібні знімки легко завантажуються зі сторінки [sentinels.copernicus.eu](http://sentinels.copernicus.eu). Досить зручний доступ до даних ДЗЗ розробила також компанія EOS Data Analytics ([lv.eosda.com/](http://lv.eosda.com/)). Просторова роздільність моделей рельєфу, які, наприклад, отримуються за безкоштовними супутниковими знімками Sentinel 1, складає від 5 м і є цілком достатньою для виявлення потенційно небезпечних ділянок русла ріки.

## Огляд проблематики досліджень

Ріка є наслідком складного фізико-географічного процесу, що розвивається в просторі і часі при взаємодії численних факторів, як природних (кліматичних, геологічних, гідрологічних), так і, особливо в наш час, антропогенних. Це динамічна система, в якій водний потік не лише формує й переформує просторову структуру ландшафту, а й закономірно впливає на склад і якість його компонентів. З кожним паводком, в ході ерозійно-аккумулятивної діяльності ріки, на різних її ділянках, відбуваються руслові переформування, які, інколи, можуть загрожувати народногосподарським об'єктам і безпеці людини. При цьому величину шкоди і збитків внаслідок діяльності ріки можуть визначати не лише масштаби природокористування в її долині, а й особливості перебігу руслового процесу на відповідній ділянці ріки, склад, вид й параметри руслових утворень.

Дослідження руслового процесу ведуться вже давно, основні практичні та теоретичні результати отримано ще в кінці 19 ст. – початку 20 ст. (роботи Л. Фарга, В.М. Лохтіна, М.С. Лелявського). В подальшому теорія руслового процесу набула значного розвитку в 50–70 рр. минулого століття. Серед робіт, присвячених дослідженням руслового процесу та основних руслоформуючих факторів, які визначають структуру та розмивну здатність відкритих водних потоків, слід відзначити роботи М.А. Великанова, В.Г. Глушкова, В.Н. Гончарова, В.І. Антроповського, К.В. Грішаніна, М.А. Ржаніцина, Н.І. Маккавєєва, М.Є. Кондратьєва, І.В. Попова, Н.С. Знаменської, Б.Ф. Сніщенка, З.Д. Копаліані, Р.С. Чалова, О.Н. Кафтана, В.В. Онищука та ін. [6–13]. В цих роботах підкреслюється, що попри велике різноманіття форм річкових русел, яке зумовлюється складною взаємодією та впливом різноманітних факторів, русла річок можуть мати подібну гідроморфологію, яка тісно пов'язана з характерними типами руслового процесу [10], кожен з яких, у свою чергу, характеризує особливості перебігу ерозійно-аккумулятивної діяльності ріки на відповідній ділянці. Формування типів руслового процесу відбувається протягом тривалого періоду часу (під дією природних чинників – віками [10]). Схеми руслових деформацій є достатньо стабільними при відносній сталості визначальних чинників руслового процесу – стоку води, стоку наносів та обмежувального фактора, не змінюються при короткотривалих змінах водного режиму ріки.

Методи математичного і чисельного моделювання кривої вільної поверхні та плану течій у природних руслах детально представлено в роботах В.А. Базилевича, Н.М. Бернадського, М.А. Великанова, К.В. Грішаніна, В.С. Кожевнікова, Н.Т. Мелещенка, В.Я. Савенка, В.А. Ткаченка, І.А. Шеренкова та ін. Усереднені значення швидкостей потоку, які отримуються при цьому в рамках одновимірної та двовимірної моделей гідродинаміки, відповідають даним натурних та лабораторних досліджень [14, 15].

Проблеми, пов'язані з дослідженнями умов формування та розвитку турбулентних течій за русловими перешкодами, як природними (гряди наносів, дерева, що впали в русло тощо), так і штучними (донні уступи гідроспоруд, опори мостових переходів, загати і напівзагати), та прогнозуванням руслової ерозії, місцевих розмивів річкових русел, спричинених такими течіями, також не є новими. Їх досліджувало ряд відомих вчених, серед яких В.С. Алтунін, К.Ф. Артамонов, В.О. Большаков,

Н.П. Буданов, В.А. Воскобійник, М.М. Журавльов, О.А. Курганович, Е. Лаурсен, В.О. Маглакелідзе, Ц.Є. Мірцхулава, В.С. Муромов, Ю.Л. Пейч, Т.П. Радченко, Г.Б. Руруа, С.Г. Ткачук, В.Ш. Ципін, О.Є. Щодро та ін. Як свідчать результати натурних та експериментальних досліджень, турбулентність водного потоку є основним фактором, який визначає напрям та інтенсивність місцевих руслових переформувань на різних ділянках ріки [2–4, 16–18], яка може суттєво підсилюватися при обтіканні різного роду донних перешкод та руслових форм (боковиків, гряд тощо, що формуються в руслі за рахунок транспорту донних наносів).

Серед експериментальних досліджень місцевих турбулентних течій та місцевих розмивів біля руслових перешкод з точки зору близькості до відтворення реальних умов їх виникнення та перебігу слід відзначити дослідження О.Є. Щодро [2–4], результати яких були прийняті нами в якості основних робочих гіпотез при імітаційному моделюванні умов виникнення місцевих розмивів русла і берегів за донними перешкодами, що формуються природним чином. Згідно з цими гіпотезами місцевий розмив інтенсифікується за косо розташованими до берегів перешкодами, відхиленими під кутами  $25\text{--}40^\circ$  вниз за течією від берега, висотою від  $1/4$  до  $1/3$  глибини потоку.

Поряд з експериментальними дослідженнями розвинутих турбулентних течій ( $Re > 20000$ ) за русловими перешкодами в останній час розвиваються і методи їх математичного моделювання. Основою для математичного моделювання кінематичних характеристик трьохвимірних турбулентних потоків є рівняння Нав'є-Стокса – рівняння динаміки реальної рідини. Методи чисельного розв'язання повної системи рівнянь Нав'є-Стокса для нестислої рідини із фізичними змінними швидкість – тиск викладені в роботах О.М. Белоцерковського, Г.І. Марчука, С. Патанкара, О.А. Приходька, П. Роуча, В.Я. Савенка, К. Флетчера, М.М. Яненка та інших. При чисельному моделюванні наразі широко застосовується метод Лакса-Вендрофа і Мак-Кормака, який полягає у застосуванні схеми «предиктор-коректор». При дослідженнях динаміки вихорових структур успішно застосовуються методи дискретних особливостей, які відображені в роботах С.М. Белоцерковського, О.Г. Гомана, Д.Н. Горелова, С.О. Довгого, І.К. Ліфанова, Г.І. Марчука, Д.І. Чернія та багатьох інших.

Наближені обчислення турбулентних течій в основному ґрунтуються на розв'язанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса (рівняння Рейнольдса), що замикаються за допомогою відповідної моделі турбулентності [19–22]. Проблемою замикання рівнянь Рейнольдса в різний час займалися С.Р. Аллмарас, Т. Карман, О.М. Колмогоров, Б. Лаундер, Ф.Р. Ментер, Л. Прандтль, О.С. Славінська, П.Р. Спаларт, Д. Сполдінг, Д. Уїлкокс та ін. В цьому випадку, з достатньою для практики точністю, актуальні швидкості і тиск турбулентної течії визначаються у вигляді усереднених значень та пульсаційних відхилень [22]. Такі моделі адекватно відповідають реальним умовам течій у відкритих руслах при числах Фруда  $Fr < 1$ , якими характеризуються потоки, далекі від критичних умов. Числа Рейнольдса є досить великими ( $Re > 20000$ ) і відповідають зоні автотурбулентності течії, коли в'язкість практично не впливає на кінематичні характеристики водного потоку. Відповідна математична модель турбулентного потоку, що ґрунтується на системі диференціальних рівнянь Рейнольдса, яка замикається за допомогою  $k - \varepsilon$  моделі турбулентності, використовувалась і нами на етапі чисельного

моделювання кінематики турбулентної течії у тривимірній локальній області за русловою перешкодою (грядкою, деревом тощо) [23–25].

### Математичне моделювання кінематики турбулентного потоку за русловою перешкодою

Згідно з запропонованим підходом, моделювання кінематичних характеристик місцевої турбулентної течії за русловою перешкодою в тривимірній області, в контексті розв’язання складної інтелектуальної задачі, здійснюється шляхом поетапного наближення.

На першому етапі виконується дослідження кінематичної структури руслового потоку для його одновимірного випадку на ділянці русла до розрахункового створу, в якому знаходиться перешкода, від деякого початкового створу, в якому, наприклад, ведуться (або відносно легко організувати) гідрометричні спостереження. Розв’язується рівняння нерівномірного плавно змінного усталеного руху водного потоку на відповідній, достатньо протяжній, ділянці непрямокутного русла з обчисленням рівнів вільної поверхні, глибин та середніх швидкостей руслового потоку у розрахункових створах:

$$\Delta Zvp_k = \frac{Q^2}{\Omega_k^2 C_k^2 H_k} \Delta l_k + \frac{Q^2}{2g} \left( \frac{1}{\Omega_{k+1}^2} - \frac{1}{\Omega_k^2} \right), \quad (1)$$

де  $\Delta Zvp_k$  – перепад вільної поверхні;  $Q$  – витрата;  $\Delta l_k = l_k - l_{k-1}$  – відстань між сусідніми розрахунковими створами;  $l_k$  – подовжні координати;  $\Omega_k$  – площа живого перерізу;  $C_k$  – коефіцієнт Шезі;  $H_k$  – середня по перерізу русла глибина;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $k = \overline{1, \beta}$  – індекси створів.

Визначення коефіцієнта Шезі  $C_k$  в розрахункових створах, який є одним з найважливіших параметрів математичної моделі руху води і від якого залежить пропускна здатність русла, на цьому етапі моделювання зручно проводити на основі ідентифікації коефіцієнта шорсткості річкових заплав за даними дистанційного зондування Землі (даними ДЗЗ) [26].

Далі, на ділянці розміщення руслової перешкоди, спочатку розглядається планова задача. Основні рівняння відкритого потоку в цьому випадку мають наступний вид:

$$\frac{1,5\sqrt{g}}{K^3 C r^2 H} \frac{\partial}{\partial r} (r H^2 u^2) + \frac{\partial (u^2)}{\partial l} = 2gJ_l - \frac{2gu^2}{C^2 H}, \quad (2)$$

$$\frac{u^2}{r} = gJ_b, \quad (3)$$

$$Q = \int_{\omega} u d\omega = const, \quad (4)$$

де  $u$  – осереднена по вертикалі швидкість;  $C, K = 0,4$  – коефіцієнти Шезі та Кармана;  $H$  – глибина потоку;  $J_l, J_b$  – подовжній та поперечний похили

водної поверхні;  $Q$  – витрата потоку;  $l, b$  – подовжня та поперечна координати;  $r$  – радіус кривизни лінії току;  $\omega$  – площа поперечного перерізу.

При чисельному розв’язанні рівнянь (2)–(4) уточнюються рівні вільної поверхні, глибини, середні значення швидкостей на вертикалях розрахункової планової області. На завершальному третьому етапі отримані кінематичні характеристики потоку в двовимірній області використовуються як початкове наближення при моделюванні динаміки турбулентної течії у тривимірній області безпосередньо за перешкодою. Для цього розглядається система диференціальних рівнянь Рейнольдса (5), що доповнюється рівнянням нерозривності (6) та замикається рівняннями  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності (8)–(9), де значення турбулентних напруг в (5) записуються згідно з градієнтною гіпотезою (7):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial (\bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0, \quad (6)$$

$$-\bar{u}'_i \bar{u}'_j = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k, \quad (7)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_D \frac{k^{3/2}}{L} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \left( C_{\varepsilon 1} \frac{P}{\varepsilon} - C_{\varepsilon 2} \right) \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (9)$$

де  $\bar{u}_i$  – компоненти вектора осередненої швидкості;  $t$  – час;  $x_i$  – координати точки;  $\bar{f}_i$  – компоненти вектора осередненої масової сили;  $\rho$  – щільність рідини;  $\bar{p}$  – осереднений гідродинамічний тиск;  $\bar{u}'_i \bar{u}'_j$  – момент кореляції пульсацій швидкостей;  $i$  – номер рівняння,  $j$  – номер члена в рівнянні ( $i, j = \overline{1,3}$ );  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера;  $\nu_t = C_\mu k^2 / \varepsilon$  – коефіцієнт турбулентної в’язкості;  $k$  – кінетична енергія турбулентності;  $\varepsilon$  – швидкість дисипації енергії турбулентності;  $L$  – довжина шляху перемішування;  $C_D = 1$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ,  $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$  – модельні константи.

Розв’язок системи рівнянь (5)–(9) дає змогу знайти донні дотичні напруги в зоні дії тривимірної гвинтоподібної течії на дно за перешкодою та встановити швидкості, які характеризують інтенсивність вимивання ґрунту.

### Імітаційне моделювання умов інтенсифікації місцевого розмиву

В якості модельної характеристики, що відображає інтенсивність потоку, в роботі приймалася сила опору дна  $F_R$  в області за донною перешкодою [25].

Припускалось, що сила опору дна в цілому характеризує перебіг локальних руслових деформацій, а дотичне напруження  $W_F/F_R$  (сила опору, яка діє на одиницю дна, де  $W_F$  – площа поверхні вальця турбулентного потоку за перешкодою) характеризує інтенсивність місцевого руслового процесу, зокрема, інтенсивність місцевого розмиву, поглиблення дна та винесення часток із зони активного вимивання [27, 28]. При цьому встановлювалась залежність сили опору дна від двох суттєвих факторів – кута розташування донної перешкоди  $\alpha$  та співвідношення висоти перешкоди і глибини потоку  $S_z$ .

Серед гідроморфологічних параметрів, які використовувалися при імітаційному моделюванні, виділялись: ширина русла в місці розташування руслової перешкоди  $B$ , м; глибина потоку  $H$ , м; гідравлічний похил водного потоку  $I$ ; середня швидкість потоку  $V$ , що встановлювалися для руслоформуючої витрати [17, 29], а також середньозважений діаметр наносів  $d_{cp}$  на розрахунковій ділянці ріки, який може визначатися за даними ДЗЗ в межах її водозбору за емпіричною залежністю [17]:

$$d_{cp} = kH_e I_e, \quad (10)$$

де  $d_{cp}$  – середньозважений діаметр наносів, мм;  $H_e$  – середньозважена абсолютна висота водозбору, м;  $I_e$  – середньозважений похил водозбору ріки;  $k$  – емпіричний коефіцієнт, який приймається рівним 0,68 для рік Прикарпаття та 0,33 для рік Закарпаття.

Тип руслового процесу контролювався за індексом (комплексом параметрів)  $(B/H)I$  [30]:

- для русел незавершеного меандрування  $(B/H)I = 0,06 \div 0,13$ ;
- русел обмеженого меандрування  $(B/H)I = 0,1 \div 0,3$ ;
- осередкового типу русел  $(B/H)I = 0,15 \div 0,3$ ;
- для русел рік вільного меандрування  $(B/H)I < 0,06$ .

Імітаційне комп'ютерне моделювання здійснювалося при різних значеннях гідроморфологічних параметрів, які приймалися в межах спостережених в натурі даних в залежності від типу руслового процесу, що має місце на відповідних ділянках річок Українських Карпат. Ці дані є результатом багаторічних експедиційних досліджень на карпатських річках, які проводилися УкрНДІГіМ (відповідальні виконавці О.Н. Кафтан та В.В. Онищук). Верифікація результатів проведеного імітаційного моделювання здійснювалась за натурними даними, які наведено в табл. 1–4.

Результати моделювання наведено на рис. 4, де показано залежності граничного (мінімально можливого) значення кута відхилення  $\alpha$  донної перешкоди вниз за течією від берега, за якого може інтенсифікуватися місцевий розмив, від діаметра часток наносів  $d$  та значень індексу  $(B/H)I$ .

Ці залежності, які відповідають максимальному впливу водного потоку на дно в області за русловою перешкодою, побудовано для характерних відповідним типам руслового процесу максимального і мінімального значень середньої швидкості води при руслоформуючих витратах.



Таблиця 1 – Приклади ділянок річок з руслами незавершеного меандрування

Ріка-ділянка	Розрахункові параметри русел, які відповідають руслоформуєчим витратам						$\alpha$ , град
	$I$	$d$ , м	$B$ , м	$H$ , м	$(B/H)I$	$V$ , м/с	
Прут-Чернівці	0,0015	0,0275	298	2,5	0,107	2,05	43
Дністер-Галич	0,001	0,052	180	3,05	0,059	2,3	39
Свіча-Зарічне	0,0015	0,042	125	1,7	0,110	1,97	43
Лімниця-Перевозець	0,0015	0,063	103	2	0,077	1,69	43
Луква-Боднарів	0,0051	0,05	30	1,54	0,099	1,78	44

Таблиця 2 – Приклади ділянок річок з руслами обмеженого меандрування

Ріка-ділянка	Розрахункові параметри русел, які відповідають руслоформуєчим витратам						$\alpha$ , град
	$I$	$d$ , м	$B$ , м	$H$ , м	$(B/H)I$	$V$ , м/с	
Репінка-Репінне	0,0055	0,096	53	1,16	0,251	2,17	43
Уж-Жорнава	0,0084	0,12	45	1,22	0,309	2,5	41
Уж-Великий Березний	0,0046	0,063	103	2	0,236	2,6	40
Чечва-Спас	0,0055	0,173	36	1,6	0,123	2,69	37
Дністер-Стрілки	0,0055	0,09	46	1,28	0,197	2,11	43
Стрий-Матків	0,0075	0,05	25	0,8	0,234	1,68	45
Стрий-Завадівка	0,005	0,063	78	1,37	0,284	1,69	44
Яблунька-Турка	0,0052	0,061	27	1,1	0,127	1,78	40
Лужанка-Гошів	0,0045	0,15	32	1	0,144	2,11	43
Прут-Кремінці	0,0085	0,245	33	1,44	0,194	2,41	38

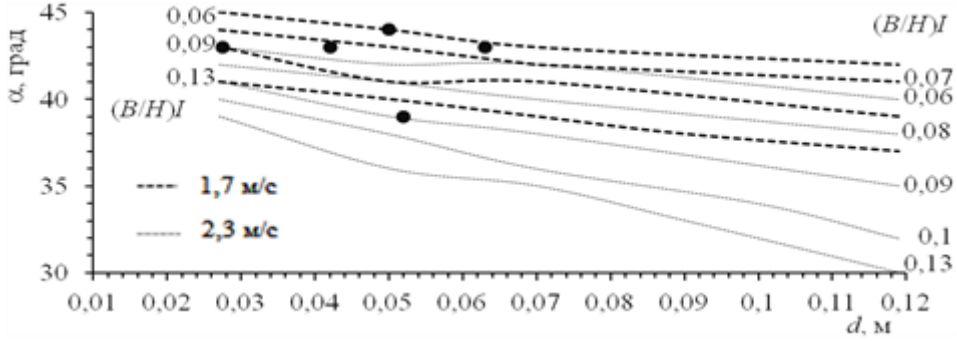
Таблиця 3 – Приклади ділянок річок з руслами осередкового типу

Ріка-ділянка	Розрахункові параметри русел, які відповідають руслоформуєчим витратам						$\alpha$ , град
	$I$	$d$ , м	$B$ , м	$H$ , м	$(B/H)I$	$V$ , м/с	
Репінка-Репінне	0,0055	0,096	53	1,16	0,251	2,17	43
Уж-Жорнава	0,0084	0,12	45	1,22	0,309	2,5	41
Уж-Великий Березний	0,0046	0,063	103	2	0,236	2,6	40
Чечва-Спас	0,0055	0,173	36	1,6	0,123	2,69	37

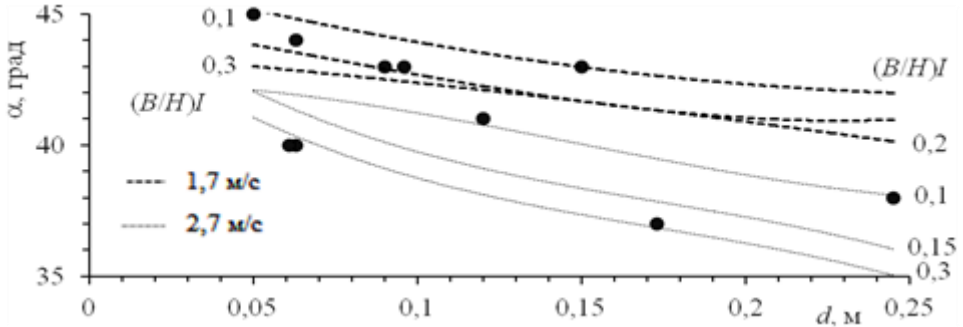
Таблиця 4 – Приклади ділянок річок з руслами вільного меандрування

Ріка-ділянка	Розрахункові параметри русел, які відповідають руслоформуєчим витратам						$\alpha$ , град
	$I$	$d$ , м	$B$ , м	$H$ , м	$(B/H)I$	$V$ , м/с	
Тиса-Вилок	0,001	0,045	274	5,4	0,050	1,46	40
Сірет-Сторожинець	0,0015	0,024	52	2	0,039	1,7	44
Міхідра-Ліповане	0,002	0,017	15	1,55	0,019	0,96	46
Дерелуй-Молодія	0,0016	0,026	17	1,23	0,022	1,26	45
Дністер-Самбір	0,002	0,055	47	1,55	0,060	1,72	44
Тисмениця-Дрогобич	0,002	0,016	28	1,67	0,033	1,4	45

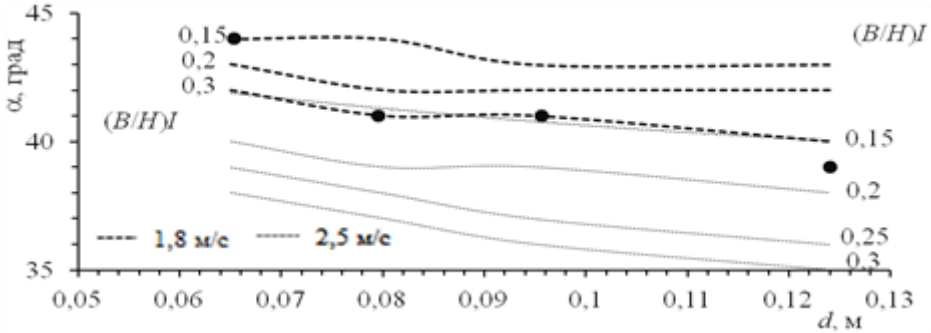
а) незавершене меандрування



б) обмежене меандрування



в) осередковий тип



г) вільне меандрування

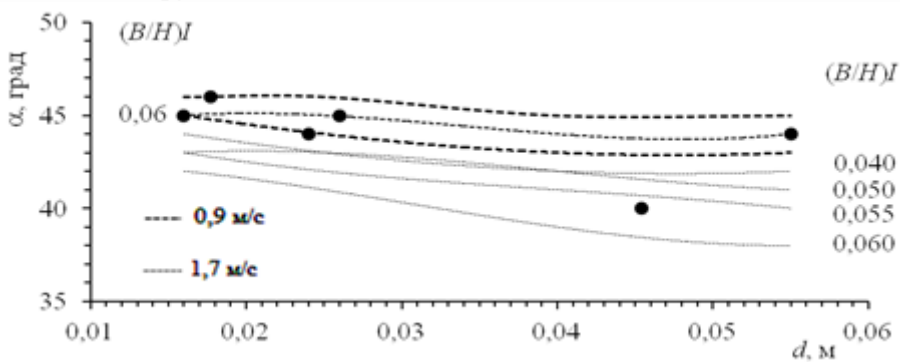


Рис. 4 – Результати імітаційного моделювання умов інтенсифікації місцевого розмиву для ділянок річок з різними типами руслового процесу (точки – результати верифікації за даними натурних ділянок)

## Висновок

Результати проведеного імітаційного моделювання умов виникнення місцевих розмивів русел рік за донними перешкодами на основі наявних геопросторових даних, зокрема даних, що стосуються особливостей перебігу руслового процесу, вказують на можливість оперативного виявлення потенційно небезпечних ділянок русел, де, в залежності від ситуації, що складається безпосередньо перед паводками, можлива інтенсифікація місцевої ерозії.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Через брак коштів на очищення річки Західний Буг, волинські землі «сповзають» до Польщі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nk.org.ua/ukraina/chez-brak-koshtiv-na-ochischennya-richki-zahidniy-bug-volinski-zemli-spozayut-do-polschi-31820>. – Назва з екрана.
2. Щодро О.Є. Порівняння розрахункових та експериментальних даних про кінематичну структуру, поле тисків, наносотранспортуючу та розмивну спроможності потоку в зоні просторової відривної течії за косо розташованими грядками та донними уступами / О.Є. Щодро // Вісник НУВГП. Вип. 4 (36). – Рівне: 2006. – Ч. 1. – С. 173–179.
3. Schodro A.E. River bed deformations near banks and hydraulic structures due to river flow / A.E. Schodro // Proc. of the Fourth Int. Conf. on River Basin Management. WIT-Press. – Southampton, Boston. – 2007. – P. 381–387.
4. Shchodro A.E. Local Scour Investigation on Steep River Bends in Ukrainian Carpathian / A.E. Shchodro // Proc. of the Tenth Int. Symposium on River Sedimentation. August 1–4. – Moscow, Russia. – V. 3. – 2007. – P. 275–284.
5. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука, 1981. – 487 с.
6. Маккавеев Н.И. Русло реки и эрозия в ее бассейне / Н.И. Маккавеев. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 280 с.
7. Великанов М.А. Русловой процесс (основы теории) / М.А. Великанов. – М.: Физматгиз, 1956. – 395 с.
8. Кондратьев Н.Е. Русловой процесс / Н.Е. Кондратьев и др. // ГГИ. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 371 с.
9. Ржаницын Н.А. Морфологические и гидрологические закономерности строения речной сети / Н.А. Ржаницын. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 238 с.
10. Антроповский В.И. Связь типов руслового процесса с определяющими факторами / В.И. Антроповский // Труды ГГИ. – 1973. – Вып. 209. – С. 25–38.
11. Гришанин К.В. Устойчивость русел рек и каналов / К.В. Гришанин. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 143 с.
12. Бухин М.Н. Основные типы русел рек Украинских Карпат / М.Н. Бухин, А.Н. Кафтан, В.А. Базилевич // Мелиорация и водное хозяйство. – К.: Урожай, 1974. – Вып. 29. – С. 74–84.
13. Русловой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР) / Под ред. Р.С. Чалова. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 336 с.
14. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков / К.В. Гришанин. – Л.: Гидрометеиздат, 2-е издание, 1979. – 312 с.
15. Савенко В.Я. Математические модели и методы расчета квазитрехмерных безнапорных потоков / В.Я. Савенко. – К.: Техніка, 1995. – 188 с.
16. Мирцхулава Ц.Е. Основы физики и механики эрозии русел / Ц.Е. Мирцхулава. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 303 с.

17. Корбутяк В.М. Гідроморфологічні аспекти пропуску паводкових витрат води гірськими руслами / В.М. Корбутяк // Вісник НУВГП. – Вип. 3(39). – Частина 2. – Рівне: – 2007. – С. 92–101.
18. Річки гірські. Регулювання русел та догляд / ВНД 33-5.5-14-03 // Видання офіційне. – К.: Державний комітет України по водному господарству, 2003. – 69 с.
19. Прандтль Л. Гидроаэромеханика / Л. Прандтль. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 576 с.
20. Wilcox D.C. Multiscale Model for Turbulent Flows / D.C. Wilcox // AIAA Journal. 1988. V. 26. – № 11. – P. 1311–1320.
21. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев. – Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2001. – 108 с.
22. Монин А.С. Статистическая гидродинамика. Теория турбулентности / А.С. Монин, А.М. Яглом. – СПб: Гидрометеоздат, 1996. – Т.2. – 742 с.
23. Ходневич Я.В. Методика чисельного моделювання турбулентних течій у відривних зонах при оцінці розмиваючої здатності потоку гірських рік / Я.В. Ходневич, О.Є. Щодро, В.М. Корбутяк // Зб. наук. праць «Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво». – Рівне: НУВГП, 2008. – Вип. 33. – С. 81–86.
24. Стефанишин Д.В. Про один підхід до прогнозування місцевих розмивів русел та берегів на передгірних ділянках рік з використанням можливостей математичного моделювання / Д.В. Стефанишин, Я.В. Ходневич, О.Є. Щодро // Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. – К.: КНУБА, ІТГП НАНУ, 2011. – Вип. 7. – С. 64–72.
25. Ходневич Я.В. Чисельне моделювання умов інтенсифікації місцевого розмиву русла ріки за донною перешкодою, що відхиляється від берега вниз за течією / Я.В. Ходневич, Д.В. Стефанишин // Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. – К.: КНУБА, ІТГП НАНУ, 2014. – Вип. 16. – С. 111–122.
26. Лагоднюк А.М. Ідентифікація коефіцієнта шорсткості річкових заплав за даними дистанційного зондування для підтримки математичного моделювання неусталеного руху води при повенях / А.М. Лагоднюк, В.М. Корбутяк, Д.В. Стефанишин // Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. Вип. 21 (№1–2). Київ: ІТГП НАНУ, КНУБА. 2016. – С. 83–94.
27. Лятхер В.М. Гидравлическое моделирование / В.М. Лятхер, А.М. Прудовський. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 392 с.
28. Щодро А.Е. Исследование структуры и размывающей способности потока за донными уступами и грядами / А.Е. Щодро // Вестник НТУУ. Машиностроение. – Вып. 38. – К.: 2000. – Т. 2. – С. 205–209.
29. Католиков В.М. Побочни в руслах рек: условия образования и их динамика / В.М. Католиков, З.Д. Копалиани // Водные ресурсы. – 2001. – Т.28, №5. – С. 579–586.
30. Корбутяк В.М. Про використання геопросторових даних при імітаційному моделюванні умов виникнення місцевих розмивів русел рік / В.М. Корбутяк, О.Є. Щодро, Я.В. Ходневич, Д.В. Стефанишин // Мат-ли 15-ї Міжнародної наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях». (3–6 жовтня 2016 р.), м. Київ, Пуща-Водиця. – К.: 2016. – С. 41–45.

*Стаття надійшла до редакції 23.06.2017*