

УДК 551.482; 627.142

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ РУСЕЛ РІЧОК УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

О.М. КОЗИЦЬКИЙ

Інститут водних проблем і меліорації НААН

Представлено результати дослідження закономірностей формування русел на прямолінійних ділянках річок Українських Карпат в умовах проходження руслоформувальних паводків.

Ключові слова: річка, русло, морфологічні параметри, руслові відклади, неоднорідність наносів, гідроморфологічні залежності, стійкість

© О.М. Козицький, 2013

Меліорація і водне господарство. 2013. Вип. 100

Актуальність роботи. У природному стані русло річки і русловий потік перебувають у постійній взаємодії і становлять єдину саморегульовальну гідродинамічну систему, що розвивається відповідно до своїх об'єктивних законів руслоформування та надзвичайно чутливо реагує на будь-яке зовнішнє втручання у її функціонування. Змінюючись під впливом потоку, русло, в свою чергу, впливає на його динаміку й умови протікання. Будь-які втручання у функціонування системи потік – русло зумовлюють зміни, що часто набувають незворотного характеру. Знання законів руслоформування і їхнє врахування є необхідною умовою при виконанні регульовальних, берегозахисних та інших інженерних робіт у руслах і на заплавах. Ігнорування природних законів руслоформування при виконанні інженерних робіт практично завжди призводить до негативних наслідків, зокрема активізації незворотних руслових деформацій у руслах річок, що в кінцевому рахунку спричиняє значні економічні затрати, необхідні для їхньої ліквідації. Оцінювання стійкості русел і прогнозування руслових процесів повинні включати виявлення зв'язків між морфологічними параметрами русла, заплави і річкової долини в цілому, а також руслоформувальними витратами, гідродинамічними характеристиками потоку, складом і стоком наносів.

Сучасний стан проблеми. Підпорядковуючись природним законам руслоформування, русловий потік протягом тривалого періоду розробляє русло, що відповідає умовам найсприятливішого його протікання.

Виконаними протягом останнього часу дослідженнями встановлено, що в результаті процесів саморегулювання русел мають місце не лише певні залежності між гідравлічними характеристиками потоку і морфологічними параметрами русла, а й тісні співвідношення між окремими морфологічними параметрами самого русла і його долини, що сформовані в результаті взаємодії з русловим потоком. До них можна віднести співвідношення ширини русла і його максимальної та середньої глибини, ширини заплави, похилу русла, радіуса кривизни, ширини поясу мандрування тощо [1].

Вивченню закономірностей руслоформування присвячена велика кількість наукових досліджень, отримано багато емпіричних і напівемпіричних залежностей, однак їхній порівняльний аналіз показує значні розбіжності отриманих результатів [2–6]. У першу чергу, це пов'язано із значними відмінностями руслоформувальних чинників, зумовлених регіональними особливостями морфологічної будови рус-

ла і заплави, гідрологічного режиму річки та випадковими чинниками. Особливо це актуально для гірських річок, де чітко простежується вертикальна зональність, виражена в зміні типів руслових процесів уздовж течії річки. Теоретичні, а також лабораторні методи досліджень враховують, головним чином, основні зв'язки між окремими чинниками, тоді як на регіональному рівні роль окремих локальних чинників може бути домінуючою. Результати проведених робіт [7] показали, що більшість гідроморфологічних залежностей не є універсальними і можуть використовуватися лише на регіональному рівні, тобто для тих річок, для яких отримано емпіричні коефіцієнти.

Перші експериментальні дослідження морфологічних залежностей річок виконано в кінці ХІХ (Флейн, 1892 р.; Лохтін, 1895 р.) і на початку минулого століть (Зідек, 1905 р.). У 1924 р. В.Г. Глушковим доведено, що для розмивних русел є характерною нелінійна залежність між шириною (B) і середньою глибиною русла ($h_{\text{сеп.}}$) в поперечному профілі, що відповідає рівню його затоплення в межах брівки [2]:

$$\sqrt{B} = \Gamma \cdot h_{\text{сеп.}}, \quad (1)$$

де Γ – гідроморфологічний параметр, що залежить від типу ґрунтів дна русла і змінюється в межах від 1,4 для скельних порід до 5,5 для легкорозмивних.

У 1962 р. формулу В.Г. Глушкова було уточнено С.Т. Алтуніним [2] завдяки врахуванню форми поперечного профілю русла і характеру самої ділянки русла:

$$B^m = k \cdot h_{\text{сеп.}} \quad (2)$$

Параметр m залежить від характеристики ділянки русла (рівнинна, передгірська, гірська, високогірна) і його форми. При $m = 0,5$ коефіцієнт k дорівнює морфологічному параметру Глушкова. Формула досить добре зарекомендувала себе у практичних розрахунках при регулюванні рівнинних річок. Дещо пізніше С.Т. Алтуніним у співавторстві з І.О. Бузуновим розроблено таблицю визначення коефіцієнтів k і m залежно від діаметра наносів, яку на підставі додаткових натурних даних було уточнено В.С. Лапшенковим [3].

Коефіцієнти k і m у формулі С.Т. Алтуніна

d , мм	1	2	5	10	20	50	100	200	316
m	0,5	0,502	0,508	0,515	0,52	0,535	0,562	0,611	0,674
k	3	3,36	3,88	4,31	4,74	5,47	6,31	7,76	9,88

У свою чергу, в 1967 р. Г.В. Железняков і С.А. Аннаєв на основі отриманих натурних даних запропонували свою емпіричну формулу визначення параметра Глушкова:

$$\Gamma = A / \sqrt{Q}, \quad (3)$$

де A – змінний параметр, що визначається залежно від характеру ґрунту русла, вмісту фракцій часток з діаметром менше 0,05 мм і середнього діаметра ґрунтового матеріалу [4].

Інша, досить велика група формул ґрунтується на аналізі гідроморфологічних залежностей, тобто залежності морфологічних параметрів русла від гідравлічних характеристик потоку. Найвідомішими з них є формули С.І. Рибкіна, М.О. Великанова, Г.В. Железнякова, К.В. Гришаніна, В.І. Антроповського, П.А. Шатберашвілі, К.К. Рабкової, О.М. Крошкіна, В.Ф. Талмази, А.Л. Радюка, С.Т. Алтуніна та ін. Гідроморфологічні залежності широко використовуються для оцінювання стійкості русел за різних типів руслових процесів. Для рівнинних річок України досить добре зарекомендувала себе методика оцінки стійкості русел О.Г. Ободовського, яку розроблено шляхом модифікації коефіцієнта стійкості Лохтіна завдяки додатковому врахуванню показника розпластання русла (B/h) і коефіцієнта ерозії на водозборі (A) [5].

На матеріалах натурних досліджень річок Українських Карпат М.Н. Бухіним доведено, що показник B/h є досить непостійним і може змінюватися в широких межах. Вивчаючи співвідношення $h/h_{\text{макс.}}$, він отримав залежність $h_{\text{макс.}} = a(h)^\chi$, де a і χ коефіцієнти форми русла і заплави. Показник χ для русел правильної геометричної форми дорівнює 1. В умовах природних русел він може змінюватися в межах від 0,4 до 1,6. В умовах стисненого русла цей показник змінюється в межах 0,35–0,75 [6]. Значення коефіцієнта a залежить від кривизни русла, співвідношення B/h , руслових відкладів та інших чинників. У результаті аналізу великої кількості натурних матеріалів, отриманих безпосередньо на річках Українських Карпат, М.Н. Бухін установив, що у залежностях типу $h = kB^m$, запропонованих Глушковим, Алтуніним та іншими авторами, коефіцієнти k і m перебувають у значно ширших діапазонах значень, ніж ними визначено. Ці розходження автор пояснює тим, що приведені залежності не враховують морфологічних особливостей конкретних ділянок русла, адже для морфологічно різнорідних ділянок русла властиві різні співвідношення щодо площі поперечних

перерізів заплави і русла, швидкостей їхньої деформації, руслоформувальних витрат тощо. Цей недолік запропоновано вирішити шляхом уведення відповідних коефіцієнтів. Для оцінювання стійкості поперечного перерізу русла запропоновано залежність

$$h_{\text{макс.}}/h = A \cdot B/h + K, \quad (4)$$

де A і K – коефіцієнти, що залежать від форми русла і заплави, руслових відкладів та гідрологічного режиму. При виконанні досліджень коефіцієнти A і K необхідно визначати для кожного створу. Числові значення коефіцієнтів М.Н. Бухін отримав на основі аналізу визначальних чинників руслових процесів. Коефіцієнт A у безрозмірній формі апроксимований залежністю

$$A=0,025 \cdot \left(\frac{d}{d_{\text{макс.}} - 1,7d} \right), \quad (5)$$

де d і $d_{\text{макс.}}$ – відповідно середньозважений і максимальний діаметри руслових відкладів. Значення коефіцієнта A збільшується зі зростанням діаметра наносів і зменшенням параметра $d_{\text{макс.}}/d$, тобто коли передгірські ділянки за характером наносів наближаються до гірських. Коефіцієнт K , що враховує вплив гідрологічного режиму, визначається залежно від числа Фруда, або співвідношення максимальної та середньої багаторічної витрат:

$$K=2,44Fr^{0,25} - 0,31; \quad (6)$$

$$K=1,88 - 0,0134 \frac{Q_{\text{макс.}}}{Q}. \quad (7)$$

Коефіцієнти K і A за непорушеного режиму змінюються в таких межах: $K=0,75 - 1,5$; $A=0,002 - 0,055$.

Виконаний аналіз співвідношення B/h вказує на значну різноманітність методичних підходів до визначення гідроморфологічних залежностей річкових русел. Через наявність великої кількості параметрів і числових коефіцієнтів у практичних розрахунках їхнє використання значно ускладнено, тому розроблення більш універсальних і простих залежностей залишається актуальним завданням гідрологічних досліджень.

Метою роботи є дослідження закономірностей розвитку руслових процесів на прямолінійних ділянках русел гірських річок Укра-

їнських Карпат на основі аналізу морфологічних параметрів русел та крупності руслових відкладів.

Головним методом досліджень є метод гідроморфологічного аналізу, що включає комплексне вивчення натурних матеріалів з метою виявлення форм проявів руслових процесів, їхніх закономірностей і зв'язків з визначальними чинниками. Проби руслових відкладів відбирали об'ємним методом у трикратній повторюваності, з подальшим розподілом їх на фракції шляхом просіювання і пофракційного зважування. Середньозважений діаметр наносів для шару самовимощення русла (в мм) розраховано за формулою:

$$D_{\text{сер.зв.}} = 0,01 \sum_{i=1}^m P_i d_i, \quad (8)$$

де P_i і d_i – відповідно вміст i -ї фракції в загальній пробі наносів, % і середній діаметр фракції, мм; m – кількість фракцій.

Використані в роботі вихідні дані отримано на основі матеріалів спостережень на 70 стаціонарних гідрологічних постах Гідрометцентру України та матеріалів багаторічних натурних експедиційних досліджень, виконаних в ІВПіМ НААН.

Результати досліджень. Розрахунки морфологічних параметрів виконували для гідрологічної фази проходження руслоформувань витрат, що характеризується максимальним стоком руслових наносів та інтенсивними русловими деформаціями. Виконаними дослідженнями морфологічних залежностей для річок Українських Карпат виявлено, що достовірність апроксимації (R^2) лінійної залежності $H_{p.ф.} = 1,21 + 0,014 B_{p.ф.}$ між шириною і глибиною потоку, які відповідають руслоформувань витратам, дорівнює 0,78. Достовірність отриманої за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel залежності $h_{p.ф.} = a \cdot B_{p.ф.}^n$ (при $a = 0,43$; $n = 0,39$) дещо нижча ($R^2 = 0,71$), але з урахуванням того, що $\lim_{B \rightarrow 0} h = 0$, в подальших дослідженнях прийнято степеневу функцію, оскільки вона більш точно відображає природний характер процесів руслоформування (рис. 1). Коefіцієнт парної кореляції R між фактичними даними і розрахованими за отриманою залежністю становить 0,87; середньоквадратична похибка визначення R дорівнює $\pm 0,029$.

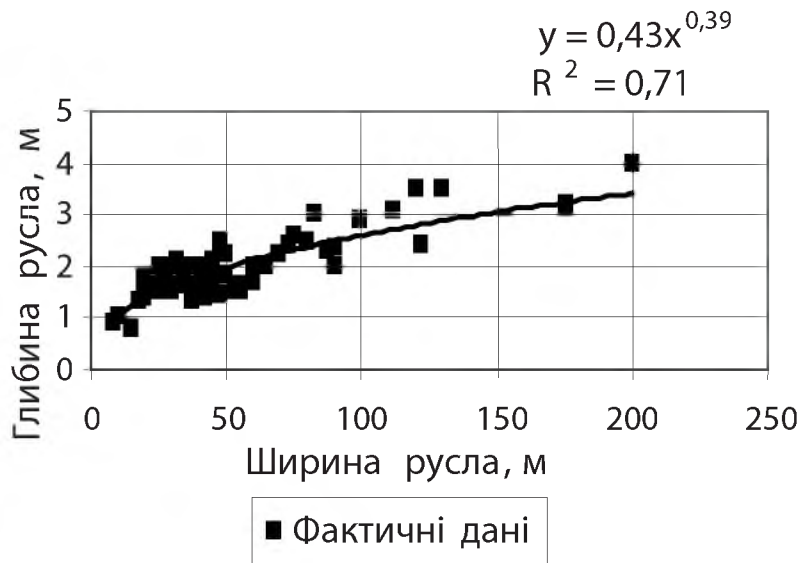


Рис. 1. Залежність глибини русла від ширини при руслоформувальній витраті для річок Українських Карпат

У ході виконання досліджень встановлено, що значення коефіцієнта a і показника степеня n є дуже мінливими і змінюються в досить широкому діапазоні зі зміною кількості членів ряду. Це певною мірою підтверджує наведений вище висновок М.Н. Бухіна про невідповідність для річок Українських Карпат рекомендованих різними авторами значень параметрів a і n , які залежать, головним чином, від форми русла і характеристик руслових відкладів. Обидва зазначені чинники в басейнах гірських річок визначаються умовами вертикальної поясності. Зі зменшенням висоти водозбору зменшується крупність наносів (рис. 2) та змінюється форма русла: від ущелино- і трапецієподібної у верхів'ї до параболічної і коритоподібної в середній та нижній течіях.

Проведений аналіз отриманих залежностей для різних діапазонів крупності самовимощення русел річок Українських Карпат показав, що співвідношення h/B головним чином зумовлене коефіцієнтом a , а значення показника степеня n змінюється в діапазоні із середнім показником 0,5. Із врахуванням відсутності закономірних змін показника степеня n , отриману залежність приведено до вигляду

$$h_{p.ф.} = a \cdot B_{p.ф.}^{0,5}, \quad (9)$$

аналогічно до формули В.Г. Глушкова. Визначений при $n = 0,5$ методом підбору (за умови досягнення найвищого коефіцієнта парної кореляції між розрахунковими та фактичними значеннями) морфо-

логічний параметр a дорівнює 0,28 (рис. 3). При цьому коефіцієнт парної кореляції R дорівнює 0,875, тобто достовірність отриманої залежності навіть дещо вища, ніж при її апроксимації з використанням Excel (рис. 4).

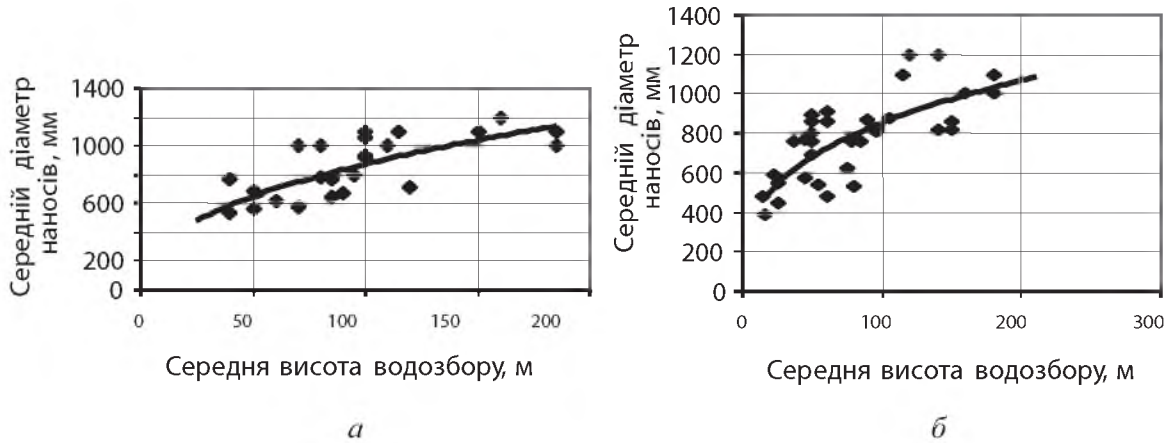


Рис. 2. Залежність крупності наносів від висоти водозбору: *a* – для річок Закарпаття; *б* – для річок Прикарпаття

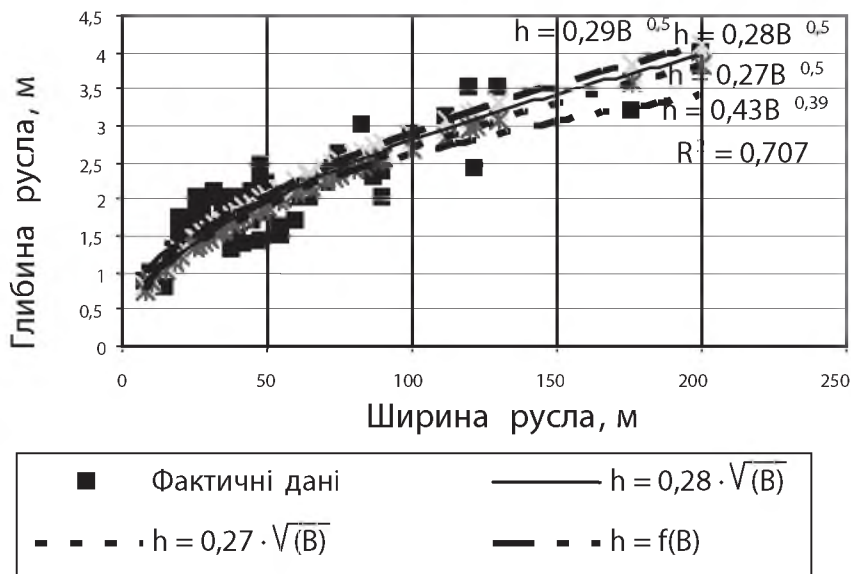


Рис. 3. Залежність глибини русла від ширини при різних значеннях коефіцієнта a

Оскільки коефіцієнт a є інтегральним показником вертикальної зональності, роботи з уточнення зв'язку $h = f(B)$ для річок Українських Карпат виконано шляхом додаткового врахування крупності самовимощення русла. Морфологічні залежності $h_{p.ф.} = a \cdot (B_{p.ф.})^n$ було побудовано окремо для ділянок русел з різною середньою крупністю

шару самовимощення руслових відкладів – $D_{сер.} = < 100 \text{ мм}$, $D_{сер.} = 100 - 200 \text{ мм}$, $D_{сер.} = 200 - 300 \text{ мм}$, $D_{сер.} = 300 - 400 \text{ мм}$ і $D > 400 \text{ мм}$, – що дало змогу значно підвищити достовірність апроксимації. Значення коефіцієнтів α підібрано таким чином, що положення кривих апроксимації практично не змінилося (в межах точності вимірювань). Водночас значно зменшився діапазон зміни коефіцієнта α , а відтак можна визначити його постійне значення для заданого діапазону крупності наносів при постійному показнику степеня, який дорівнює 0,5 (рис. 5).

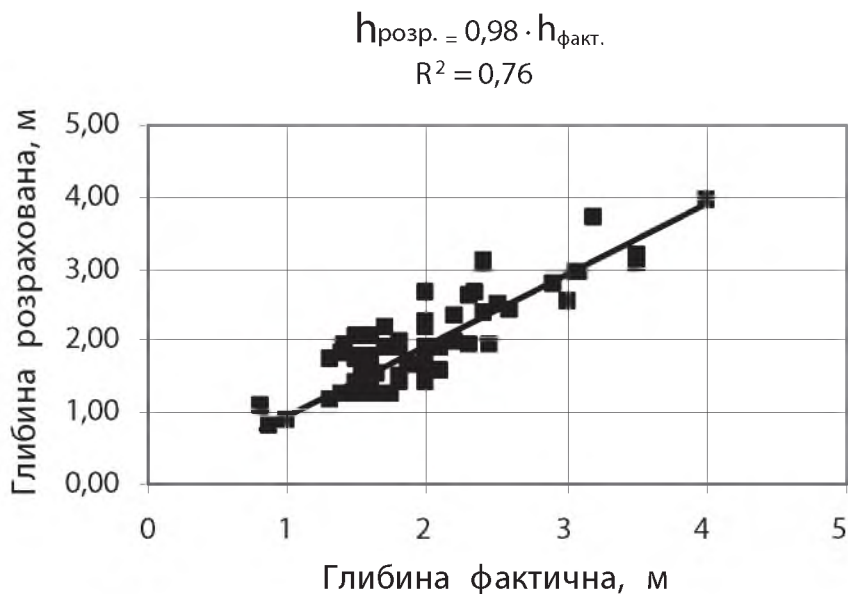


Рис. 4. Співвідношення розрахункових і фактичних значень глибини русла

Таким чином, у результаті виконаних досліджень для русел гірських річок отримано емпіричні формули функціональної залежності ширини і глибини русел з постійним коефіцієнтом, а для кожного з п'яти діапазонів крупності руслових відкладів і єдиним показником степеня $n = 0,5 = \text{const}$:

$$h_{р.ф.} = 0,27 \sqrt{B_{ф.р.}}, \quad D_{сер.} < 100 \text{ мм}; \quad (10)$$

$$h_{р.ф.} = 0,28 \sqrt{B_{ф.р.}}, \quad D_{сер.} = 100 - 200 \text{ мм}; \quad (11)$$

$$h_{р.ф.} = 0,29 \sqrt{B_{ф.р.}}, \quad D_{сер.} = 200 - 300 \text{ мм}; \quad (12)$$

$$h_{р.ф.} = 0,32 \sqrt{B_{ф.р.}}, \quad D_{сер.} = 300 - 400 \text{ мм}; \quad (13)$$

$$h_{p.ф.} = 0,36 \sqrt{B_{ф.р.}}, \quad D_{сер.} > 400 \text{ мм.} \quad (14)$$

Коефіцієнт парної кореляції (R) між фактичними даними і розрахованими за отриманими залежностями в середньому становить 0,92.

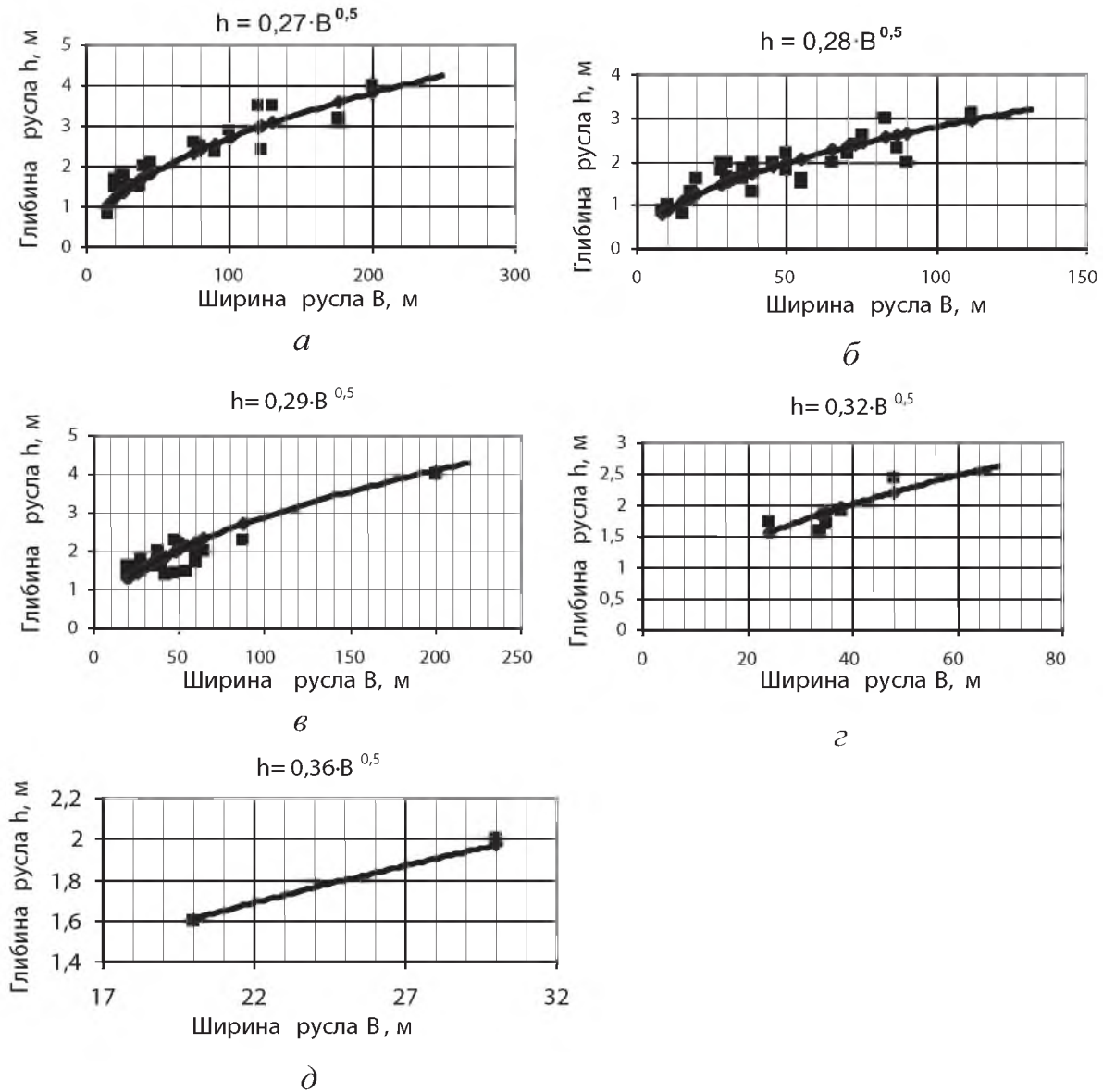


Рис. 5. Залежність глибини русла від ширини на ділянках з різною крупністю шару самовимощення русла: *a* – при $D < 100$ мм; *б* – при $D = 100 - 200$ мм; *в* – при $D = 200 - 300$ мм; *г* – при $D = 300 - 400$ мм; *д* – при $D > 400$ мм

Отримані емпіричні формули близькі за структурою до формул С.Т. Алтуніна [2], але, на відміну від них, показник степеня n є постійним. На відміну ж від параметра В.Г. Глушкова, значення коефіцієнта a залежить лише від крупності руслових відкладів, як

інтегрального показника вертикальної поясності басейну річки, і змінюється в досить вузькому діапазоні – від 0,27 до 0,36.

Висновок. Визначені для встановлених діапазонів середньої крупності наносів шару самовимощення русла постійні значення безрозмірного коефіцієнта a є морфологічними параметрами русел і рекомендуються для практичного використання при розробленні прогнозів динаміки русел річок Українських Карпат та при виконанні проектних робіт з регулювання русел. Оскільки з другої половини минулого століття для річок Українських Карпат характерним є інтенсивне врізання русел, що зумовлене видобутком руслового алювію, отримані морфологічні залежності дадуть змогу виконати прогноз інтенсивності руслових деформацій з урахуванням обмежувальних чинників (геологічної будови русла та гідротехнічних споруд). Врахування отриманих залежностей необхідне за проектування русловиправних трас і визначення параметрів водопропускного коридора під час обвалування русел з метою забезпечення найсприятливіших умов пропуску паводкових потоків.

1. *Кондратьев Н.Е.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса / Н.Е. Кондратьев, И.В. Попов, Б.Ф. Сنيщенко. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 272 с.

2. *Алтунин С.Т.* Регулирование русел рек при водозаборе / Алтунин С.Т. – М.: Сельхозгиз, 1956. – 248 с.

3. *Лапшенков В.С.* Прогнозирование русловых деформаций в бьефах речных гидроузлов / Лапшенков В.С. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 240 с.

4. *Железняков Г.В.* Пропускная способность русел каналов и рек / Железняков Г.В. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.

5. *Ободовський О.Г.* Гідролого-екологічна оцінка руслових процесів (на прикладі річок України) / Ободовський О.Г. – К.: Ніка-центр, 2001. – 274 с.

6. *Бухин М.Н.* Исследование связей между морфологическими элементами, характеризующими поперечное сечение речного русла / Бухин М.Н. // Мелиорация и водное хозяйство. – К.: Урожай, 1971. – Вып. 17. – С.122–132.

7. *Дослідити* закономірності і динаміку розвитку руслових процесів та розробити методи визначення гідроморфологічних характеристик і оцінки стійкості русел гірських річок на ділянках з різними типами руслових процесів. – К.: ІГіМ УААН, Проміжний звіт про НДР за 2007 р., № д/р 0106U004947.

Представлены результаты исследования закономерностей формирования русел на прямолинейных участках рек Украинских Карпат в условиях прохождения руслоформирующих паводков.

It is given the results on the research regularity of bed formation on the straight portions of the rivers in the Ukrainian Carpathians under the conditions of bed – building floods.