

Залежність площ суббасейнів і ширини річкових долин від порядку Стралера: басейни Пруту та Сірету

Ольга В. Паланичко , Дмитро І. Ігонькін 

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58002, Україна

Анотація

Метою дослідження є кількісне виявлення хоричного та регіонального рівнів річково-басейнових геосистем на основі аналізу залежностей між порядком річкової мережі за Стралером, площею суббасейнів і шириною річкових долин на прикладі басейнів Пруту та Сірету в межах України. Актуальність дослідження зумовлена потребою формалізації меж між ієрархічними рівнями басейнової організації, які традиційно визначаються переважно якісно.

Методологічною основою дослідження є поєднання морфометричного аналізу, ГІС-моделювання, цифрової моделі рельєфу ALOS PALSAR із просторовою роздільною здатністю 12,5 м та алгоритмічної обробки просторових даних засобами Python. Для виділення суббасейнів застосовано визначення вододільних ліній, watershed-сегментацію, stream burning, обчислення напрямків стоку за алгоритмом D-infinity і формування неперекривних водозбірних одиниць. Ширину річкових долин оцінено шляхом трасування поперечних профілів перпендикулярно до локальної осі русла з урахуванням висоти над руслом, положення вододілів і перетинів із річками вищого порядку.

В результаті змодельовано суббасейни Пруту та Сірету 3-7-го порядків за Стралером і визначено їхні площі. Встановлено, що розподіл площ є асиметричним і наближається до логнормального, а середня площа суббасейнів зі зростанням порядку збільшується майже експоненційно. Аналіз ширини річкових долин показав її загальне збільшення зі зростанням порядку водотоку, однак ця залежність істотно модифікується геоморфологічними умовами. Найбільші розширення долин пов'язані з переходом річкових систем із гірських районів у передгірні та рівнинні області.

Поєднаний аналіз площ суббасейнів і ширини річкових долин дає змогу кількісно охарактеризувати перехід від хоричного до регіонального рівня річково-басейнової організації. Площа суббасейну відображає горизонтальний масштаб водозбору, тоді як ширина долини характеризує морфологічну вираженість долини структури. Разом ці показники можуть використовуватися як взаємодоповнювальні критерії для аналізу ієрархічної будови річково-басейнових геосистем і порівняльних геоморфологічних досліджень.

Ключові слова

ГІС-моделювання, річкова долина, річково-басейнова система, хоричний рівень, регіональний рівень.

Надійшла до редакції: 15 травня 2026 / Прийнята: 10 червня 2026 / Опублікована онлайн: 14 червня 2026

Dependence of Subbasin Areas and River Valley Widths on Strahler Order: The Prut and Siret Basins

Olha V. Palanychko, Dmytro I. Igonkin

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, St. Kotsiubynskoho, 2, Chernivtsi, 58002, Ukraine

Abstract

The aim of this study is to quantitatively identify the choric and regional levels of river-basin geosystems based on an analysis of the relationships between the Strahler order of the river network, subbasin area, and river valley width, using the Prut and Siret basins within Ukraine as a case study. The relevance of the research is determined by the need to formalize the boundaries between hierarchical levels of basin organization, which have traditionally been defined mainly in qualitative terms.

The methodological basis of the study combines morphometric analysis, GIS modelling, the ALOS PALSAR digital elevation model with a spatial resolution of 12.5 m, and algorithmic processing of spatial data using Python. Subbasins were delineated through the identification of watershed divides, calculation of flow directions using the D-infinity algorithm, and the formation of non-overlapping catchment units. River valley width was assessed by tracing cross-sectional profiles perpendicular to the local channel axis, considering elevation above the channel, the position of watershed divides, and intersections with higher-order rivers.

As a result, 3rd- to 7th-order Strahler subbasins of the Prut and Siret were modelled and their areas were determined. It was established that the distribution of subbasin areas is asymmetric and approximates a lognormal distribution, while the mean subbasin area increases almost exponentially with increasing order. The analysis of river valley width showed a general increase with increasing stream order; however, this relationship is substantially modified by geomorphological conditions. The greatest valley widening is associated with the transition of river systems from mountainous areas to foothill and lowland regions.

The combined analysis of subbasin areas and river valley widths makes it possible to quantitatively characterize the transition from the choric to the regional level of river-basin organization. Subbasin area reflects the horizontal scale of the catchment, whereas valley width characterizes the morphological expression of the valley structure. Together, these indicators may be used as complementary criteria for analyzing the hierarchical structure of river-basin geosystems and for comparative geomorphological studies.

Keywords

GIS modelling, river valley, river-basin system, choric level, regional level.

Received: May 15, 2026 / Accepted: June 10, 2026 / Published online: June 14, 2026

Corresponding author:

Olha V. Palanychko, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, St. Kotsiubynskoho, 2, Chernivtsi, 58002, Ukraine
Email: ihonkin.dmytro@chnu.edu.ua

© 2026 The Authors. Published by Taras Shevchenko National University of Kyiv. This is an open-access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Вступ

Сучасне управління водними ресурсами дедалі більше ґрунтується на інтегрованому басейновому та просторовому плануванні, що потребує розуміння річкового басейну як цілісної ієрархічно організованої геосистеми. Дуже важливо розмежовувати хоричний та регіональний рівні ландшафтної організації. За М. Д. Гродзинським (Grodzynskyi, 2005), хоричний рівень відображає внутрішню будову ландшафтів через поєднання місцевостей, урочищ, мезоформ рельєфу, долинних і руслових комплексів, тоді як регіональний рівень пов'язаний із більшими природними системами, формування яких визначається ширшими морфоструктурними, тектонічними та кліматичними чинниками.

Об'єктом дослідження є річково-басейнові системи Пруту та Сірету. Зокрема їхні суббасейни різних порядків за Стралером і пов'язані з ними річкові долини у межах України. Предметом дослідження є морфометричні характеристики цих басейнових систем – площа суббасейнів, порядок річкової мережі та ширина річкових долин, а також закономірності їхньої зміни залежно від ієрархічного положення водотоків. У роботі використано цифрову модель рельєфу ALOS PALSAR (ASF DAAC, 2014) із просторовою роздільною здатністю 12,5 м та ГІС-методи як джерела просторової інформації.

Метою дослідження є кількісне виявлення хоричного та регіонального рівнів річково-басейнових геосистем на основі аналізу залежностей між порядком річкової мережі за Стралером, площею суббасейнів і шириною річкових долин на прикладі басейнів Пруту та Сірету. Такий підхід дає змогу оцінити, як зі зміною ієрархічного рівня басейну змінюються його морфометричні параметри, а також визначити ознаки переходу від локально зумовленого хоричного рівня до ширшого регіонального рівня басейнкової організації. Актуальність дослідження полягає в потребі кількісного обґрунтування меж між цими рівнями, які традиційно визначаються переважно якісно, тоді як використання цифрової моделі рельєфу та ГІС-методів створює основу для порівняльного й масштабованого аналізу річково-басейнових геосистем.

2. Матеріали та методи

Методологічно дослідження базується на поєднанні морфометричного аналізу річкової мережі, дешифрування супутникових знімків та оцінки басейнів за порядками Стралера. Побудова меж водозборів у ГІС традиційно ґрунтується на цифровій моделі рельєфу, алгоритмах напрямку стоку та розрахунку висхідної водозбірної площі. Однак для великої кількості малих басейнів у складному рельєфі автоматичне виділення водозборів часто потребує додаткової корекції через накладання меж, нечіткість вододілів і похибки DEM. Тому в роботі застосовано авторську Python-процедуру, орієнтовану на формування неперекривних суббасейнів.

Першим етапом методики є визначення вододільних

ліній як основи для подальшої побудови меж басейнів. Для цього використовуються растри акумуляції стоку, цифрової моделі рельєфу та річкової мережі. Спочатку на основі річкової мережі формується бінарна маска, у якій за допомогою аналізу 8-зв'язного сусідства визначаються вузли злиття річок – комірки з трьома або більше сусідніми річковими пікселями. Після цього річкова мережа розділяється на окремі ділянки між вузлами шляхом маркування зв'язних компонентів, такий підхід є класичним при аналізі цифрових зображень (Rosenfeld, & Pfaltz, 1966).

На першому етапі за растрами акумуляції стоку, DEM і річкової мережі визначалися вододільні лінії. Річкова мережа розділялася на ділянки між вузлами злиття за допомогою аналізу 8-зв'язного сусідства та маркування зв'язних компонентів. Далі виконувалася маркерна watershed-сегментація інвертованого растра акумуляції стоку, що дало змогу виділити первинні межі суміжних водозбірних одиниць. Така процедура ґрунтується на класичному watershed-перетворенні на основі імітації затоплення поверхні (Vincent & Soille, 1991) та морфологічному підході до автоматичного виділення басейнів за цифровими моделями рельєфу (Soille & Ansoult, 1990).

Далі зберігалися лише граничні пікселі з акумуляцією стоку нижче емпіричного порогу 2000 м², підбраного для гірської частини басейнів Пруту та Сірету з метою виділення вододільних поверхонь і хребтових ліній. Отримані межі зводяться до однопіксельного представлення за допомогою скелетизації. На завершальному етапі видаляються короткі ізольовані компоненти, кінцеві гілки з недостатнім локальним перепадом висот та окремі пікселі з низькою рельєфною вираженістю, після чого формується фінальний растр вододілів.

Наступним етапом методики є побудова неперекривних суббасейнів для річкових ділянок заданого порядку Стралера. Для побудови моделі використовуються мапа висот з вилученими заглибленнями. Вилучення западин може робитися за допомогою геоінформаційної системи використовуючи алгоритм Венга та Ліу (Wang & Liu, 2006). Для того щоб виділення басейну не переходило між суббасейнами на рівнинних ділянках необхідно пікселі річкової мережі штучно знизити на задану величину, тобто застосувати процедуру stream burning, яка використовується для узгодження поверхні DEM з відомою гідрографічною мережею (Lindsay, 2016).

На попередньо обробленій мапі висот обчислюються напрями стоку за алгоритмом D-infinity, у якому напрямок потоку визначається як напрямок найкрутішого схилу на трикутних гранях у межах 3×3 вікна. На відміну від D8-підходу, D-infinity допускає неперервний кут напрямку стоку та краще описує розподілений поверхневий стік на складному рельєфі (Tarboton, 1997). Отриманий растр напрямків додатково модифікується: пікселі раніше визначених вододілів задаються як nodata, завдяки чому трасування водозборів зупиняється на вододільних лініях і не перетинає межі сусідніх басейнів. Далі для річкових ділянок заданого порядку визначаються гирлові компоненти – пікселі порядку N, які безпосередньо прилягають до річок вищого порядку.

Для кожної притоки стартову точку трасування зміщували вгору за течією від гирла, щоб уникнути її помилкового потрапляння на головне русло. Якщо первинне трасування не охоплювало відповідну річкову ділянку, застосовували резервну процедуру з кількома стартовими пікселями вздовж осі притоки та подальшим об'єднанням отриманих водозборів.

Оскільки водозбори, отримані трасуванням від нижчих за течією точок, можуть включати площі вище розташованих приток, фінальне присвоєння суббасейнів виконується у порядку зростання площі водозбору. Менші, тобто більш верхові, басейни отримують мітки першими, а наступні басейни займають лише ще не присвоєні комірки. Це забезпечує формування неперекривного растру суббасейнів. На завершальних етапах примусово забезпечується належність руслових пікселів кожної притоки до відповідного суббасейну, заповнюються внутрішні незаповнені порожнини за допомогою евклідового перетворення відстані, а вузькі фонові «вклинення» поглинаються найближчими басейнами. У результаті формується підсумковий растр, у якому кожен суббасейн має унікальний числовий ідентифікатор.

Коректність автоматично виділених суббасейнів перевірено вручну в QGIS для басейнів 5-го та 6-го порядків. Оцінювали відповідність меж вододілам на DEM, узгодженість із річковою мережею, правильність прив'язки руслових пікселів і відсутність просторового накладання.

Окремим етапом методики є оцінювання ширини долини для кожного пікселя річкової мережі. Річкова мережа розкладається на окремі ділянки. Для цього спочатку обчислюється кількість 8-зв'язних річкових сусідів для кожного пікселя, після чого пікселі з трьома або більше сусідами інтерпретуються як вузли злиття. Кластери таких вузлів об'єднуються за допомогою маркування зв'язних компонентів, а решта річкової мережі поділяється на окремі сегменти з урахуванням порядку Стралера та значень акумуляції стоку.

Для кожної річкової ділянки визначаються початкова та кінцева точки. Якщо задана гирлова точка Пруту або Сірету потрапляє в межі відповідного сегмента, вона використовується як початок; в іншому випадку початковою точкою вважається піксель із найбільшою акумуляцією стоку. Кінцева точка визначається як найвіддаленіший піксель уздовж скелета річкової ділянки за допомогою пошуку в ширину в межах 8-зв'язного сегмента. Після цього всі сегменти нумеруються за басейном, порядком Стралера та максимальною акумуляцією стоку, що забезпечує послідовне представлення річкових ділянок.

Власне оцінювання ширини долини виконується перпендикулярно до локальної осі русла. Для кожного річкового пікселя напрямок русла апроксимується шляхом аналізу локального 7×7-околу річкових пікселів. Далі від кожного річкового пікселя здійснюється покрокове трасування в обидва боки вздовж перпендикуляра до русла. Рух зупиняється за однією з кількох умов: досягнення заданого порогу висоти над руслом, перетин попередньо визначеної вододільної лінії, потрапляння на ділянку, нижчу за висоту русла, вихід за межі матриці, досягнення пікселя *nodata* або перетин іншої річки того самого чи вищого порядку. У межах цього дослідження

поріг висоти над руслом емпірично встановлено на рівні 20 м. Вибір такого значення зумовлений вертикальною точністю використаної цифрової моделі рельєфу, а також результатами тестування алгоритму: за менших порогових значень великі долини Пруту та Сірету розпізнавалися неповно або фрагментарно. Поріг 20 м дав змогу стабільніше відокремити долинні поверхні від прилеглих схилів і вододільних ділянок. За змістом цей критерій відповідає ідеї показника HAND - Height Above Nearest Drainage (Nobre et al., 2011), який використовується для розмежування долинних ділянок і вищих елементів рельєфу за їхньою відносною висотою над дренажною мережею. Для кожного боку профілю фіксується відстань до першої умови зупинки, а сумарна ширина долини визначається як сума лівої та правої півширин.

Щоб уникнути накладання поперечників різних рівнів річкової мережі, додатково виконується фільтрація перетинів. Пікселі, для яких поперечний профіль перетинає річку вищого порядку, вилучаються з подальших розрахунків. Окрім того, поперечники нижчого порядку пригнічуються, якщо вони накладаються на вже прийняті поперечники річок вищого порядку. Така процедура забезпечує пріоритет головних долин і запобігає завищенню ширини для малих приток у місцях їхнього входження до ширших долин.

3. Результати та обговорення

В результаті описаних вище алгоритмів вдалося змоделювати басейни Сірету та Пруту від 3-го до 7-го порядків та порахувати їхні площі. На рисунках нижче (рис. 1, 2) показано басейни 5-го та 6-го порядків. При побудові знайдено на річці Прут 4999 басейнів 3-го порядку, 1047 басейнів 4-го порядку, 221 басейн 5-го порядку, 52 басейни 6-го порядку та 15 басейнів 7-го порядку. На річці Сірет виділено 1301 басейн 3-го порядку, 285 басейн 4-го порядку, 66 басейнів 5-го порядку, 10 басейнів 6-го порядку та 3 басейни 7-го порядку.

Аналіз площ виділених суббасейнів показав, що їхній розподіл не відповідає нормальному закону, а має виражену асиметрію з переважанням басейнів меншої площі та наявністю окремих великих значень. На прикладі суббасейнів Пруту 4-го порядку видно, що розподіл вихідних значень площ є асиметричним (рис. 3), тоді як після логарифмування площ розподіл набуває форми, ближчої до нормальної (рис. 4). Це дає підстави розглядати розподіл площ суббасейнів як наближений до логнормального, хоча наявність крайніх значень може зумовлювати відхилення від ідеальної логнормальної моделі.

Площі басейнів відносно порядку можна показати на графіку на рисунку 5. Можна побачити що площа басейну зростає експоненційно. Зі збільшенням порядку на одну одиницю середня площа суббасейнів зростає приблизно у 4,5 раза для Пруту та у 4,48 раза для Сірету. Також видно, що ми маємо велике зростання площі в абсолютних величинах починаючи з 5-го порядку.

Аналіз ширини річкових долин показав її загальне збільшення зі зростанням порядку водотоку за

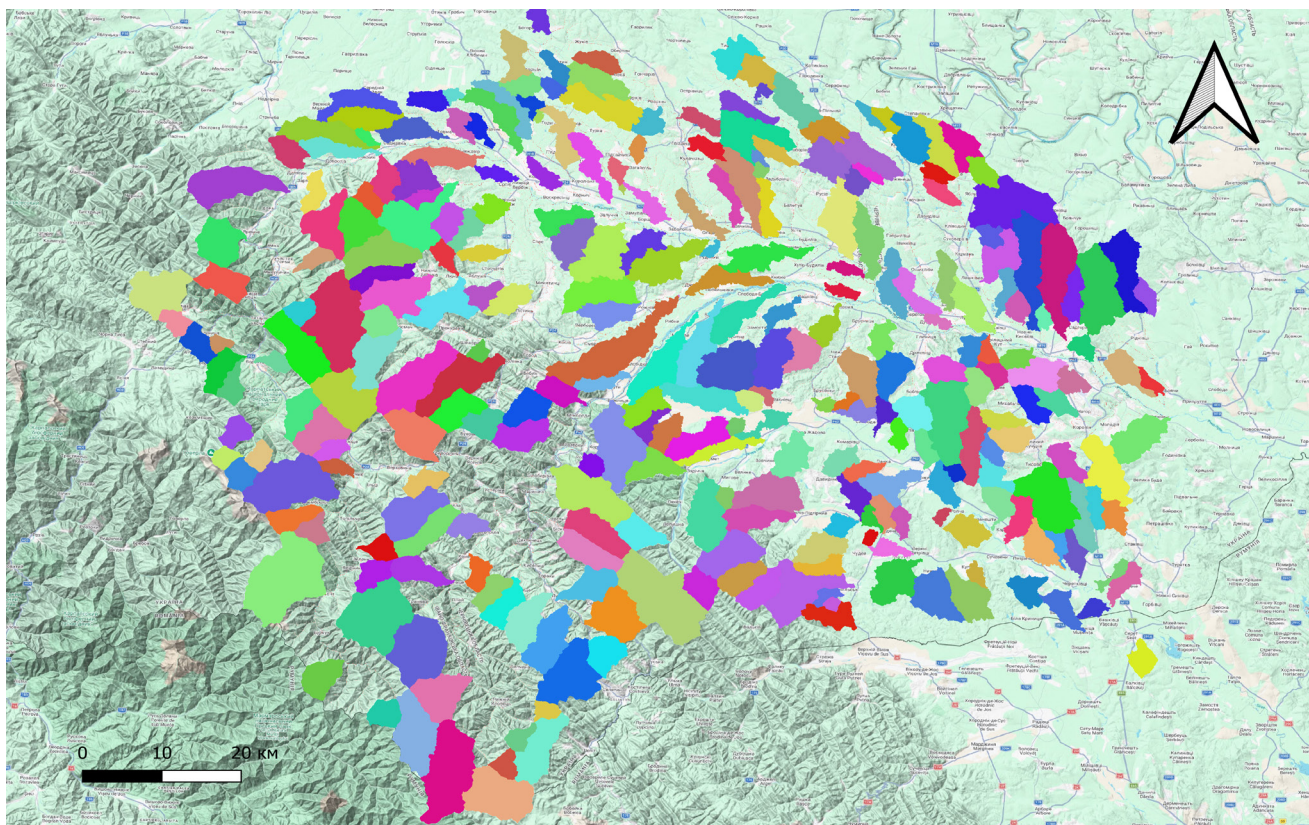


Рис. 1. Суббасейни 5-го порядку (позначені різними кольорами).
Fig. 1. Fifth-order subbasins (marked with different colors).

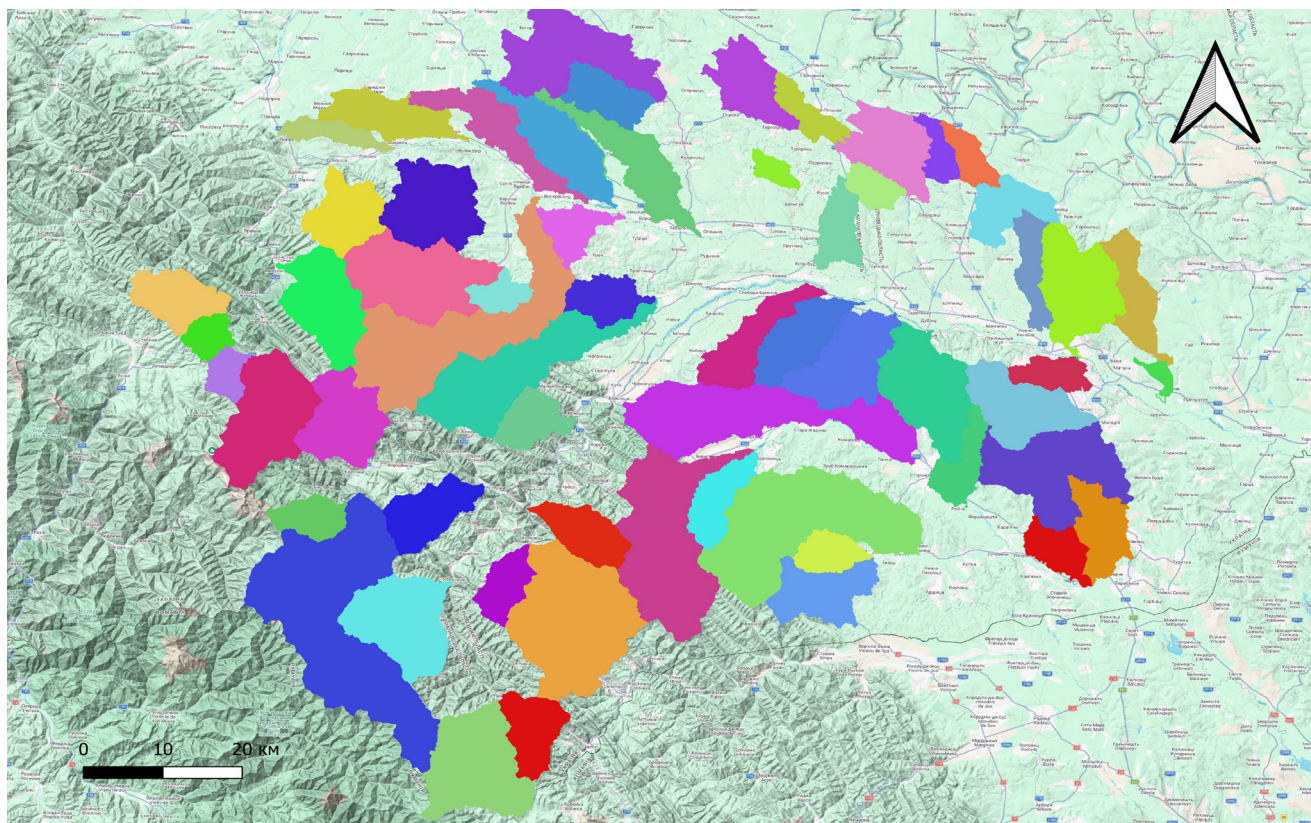


Рис. 2. Суббасейни 6-го порядку (позначені різними кольорами).
Fig. 2. Sixth-order basins (marked with different colors)

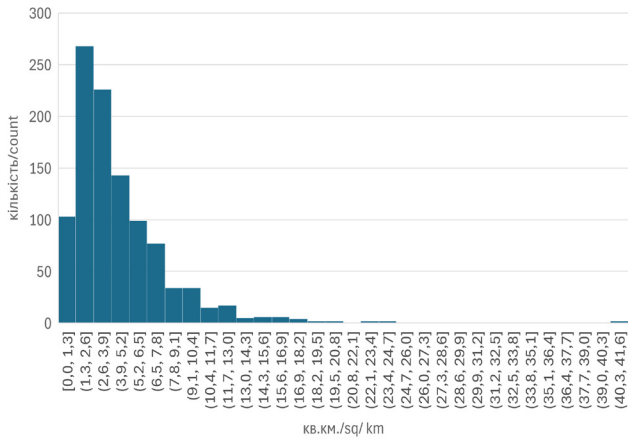


Рис. 3. Розподіл площ суббасейнів 4-го порядку р. Прут (кількість басейнів що попадає в інтервал площі).
Fig. 3. Area distribution of fourth-order Prut subbasins(count of basins in each area interval).

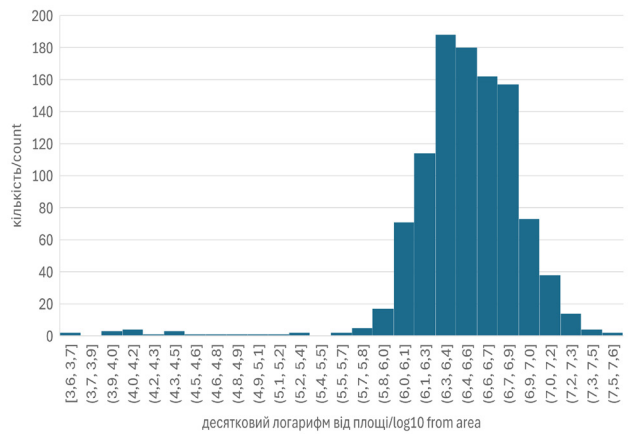


Рис. 4. Розподіл логарифмів площ суббасейнів р. Прут 4-й порядок (кількість басейнів в інтервалах десятичного логарифму площі).
Fig. 4. Distribution of area logarithms for fourth-order Prut subbasins (count of basins in log10 of area).

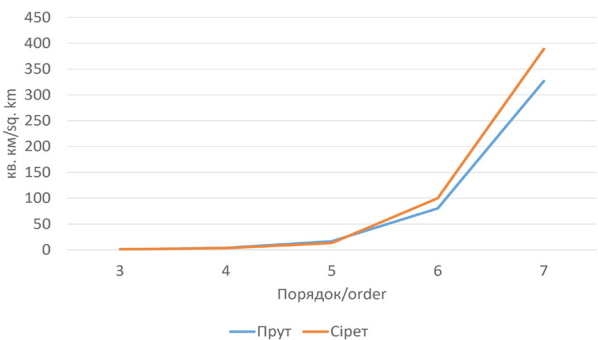


Рис. 5. Залежність медіанної площі басейнів від порядку водотоку.
Fig. 5. Relationship between the median basin area and stream order.

Стралером. Найбільші значення ширини приурочені до ділянок переходу річок із гірських районів у передгірні та рівнинні області (рис. 6). Залежність середньої ширини долини від порядку водотоку показано на рисунку 7:

для Сірету різке збільшення ширини простежується на 7-му порядку, тоді як для Пруту - на 8-му.

На відміну від аналізу площ, який стосується виділених суббасейнів 3-7-го порядків, оцінювання ширини долин виконувалося для річкових ділянок різних порядків. Тому на графіку залежності ширини долини від порядку водотоку представлено ширший діапазон порядків річкової мережі, зокрема до 8-го порядку для Сірету та до 9-го порядку для Пруту.

Отримані результати підтверджують ієрархічний характер організації річково-басейнових систем Пруту та Сірету. Зі зростанням порядку річкової мережі за Стралером закономірно збільшується середня площа суббасейнів, а розподіл площ має асиметричний характер із переважанням малих басейнів і наявністю окремих великих значень. Після логарифмування цей розподіл наближається до нормального, що узгоджується з результатами глобального дослідження Basin90m, у якому подібний характер розподілу встановлено для морфометричних параметрів дренажних басейнів (He et al., 2024).

Поєднаний аналіз площ суббасейнів і ширини річкових долин дає змогу кількісно охарактеризувати перехід від хоричного до регіонального рівня річково-басейнової організації. Площа суббасейну відображає масштаб водозбору та ступінь інтеграції території річковою мережею, тоді як ширина долини характеризує морфологічну вираженість долини системи й ступінь її розвитку в межах певних геоморфологічних умов. На хоричному рівні переважають малі водозбори нижчих порядків із незначними площами та відносно вузькими долинами, де провідну роль відіграють локальні чинники рельєфу, ерозійного розчленування й будови малих басейнів. Натомість зі зростанням порядку водотоку одночасне збільшення площі суббасейнів і ширини долин свідчить про укрупнення басейнової структури та формування регіонального рівня, у межах якого річкова система інтегрує більші території й відображає ширші геоморфологічні закономірності.

Для досліджуваних басейнів найбільш виразний перехід до регіональної структури простежується, починаючи з 5-го порядку. Саме на цьому рівні відбувається помітне зростання площ суббасейнів, а для вищих порядків - істотне розширення долин, особливо на ділянках переходу від гірського до передгірно-рівнинного рельєфу. Тому 5-й порядок можна розглядати як перехідний між хоричним і регіональним рівнями, тоді як басейни 6-7-го порядків мають виразніші ознаки регіонального рівня організації. Водночас ширина долини уточнює це розмежування, оскільки вона фіксує не лише ієрархічне положення водотоку, а й зміну геоморфологічних умов. Зокрема, різке збільшення ширини долини для Сірету проявляється вже на 7-му порядку, а для Пруту - на 8-му, що пов'язано з різним положенням цих річок щодо межі гірських і передгірно-рівнинних територій. Отже, площа суббасейнів і ширина долин є взаємодоповнювальними показниками переходу від хоричної до регіональної організації річково-басейнових геосистем.

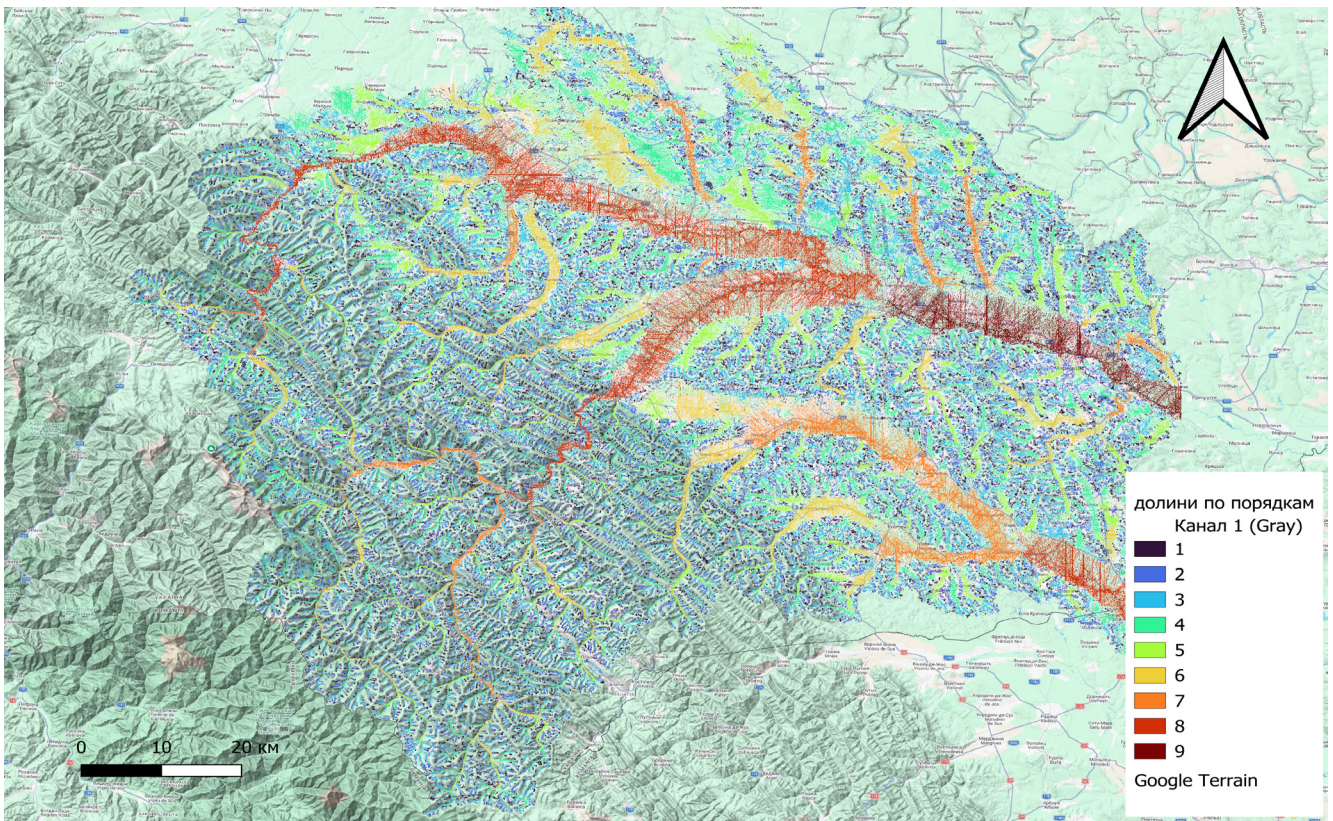


Рис. 6. Змодельовані долини (кольором позначено порядок, кожна лінія відображає змодельовану долину в даній точці).
Fig. 6. Modeled valleys (color marks order, line at each pixel shows modeled valley).

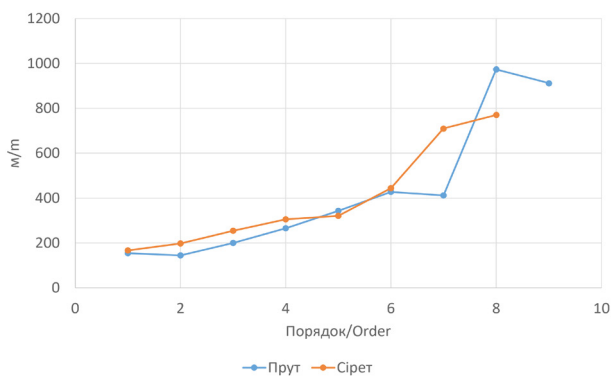


Рис. 7. Залежність медіанної ширини долини від порядку водотоку.
Fig. 7. Relationship between the median valley width and stream order.

4. Висновки

У результаті дослідження встановлено зв'язок між порядком річкової мережі за Стралером, площею суббасейнів і шириною річкових долин. Площа суббасейнів зі зростанням порядку збільшується нерівномірно й має характер, близький до експоненційного, що відображає ієрархічну будову річкової мережі.

Ширина річкових долин також загалом зростає зі збільшенням порядку водотоку, однак ця залежність значною мірою модифікується геоморфологічними умовами. Найбільші розширення

долин пов'язані з переходом річкових систем із гірських районів у передгірні та рівнинні області.

Поєднаний аналіз площ суббасейнів і ширини річкових долин дає змогу кількісно охарактеризувати перехід від хоричного до регіонального рівня річково-басейнової організації. Басейни нижчих порядків мають ознаки хоричного рівня, тоді як збільшення площі водозборів і розширення долин у вищих порядках відображає формування регіональної структури.

Порівняння басейнів Пруту та Сірету показало загальну подібність основних тенденцій, але відмінності між ними зумовлені особливостями рельєфу, будови річкової мережі та положенням окремих ділянок у межах гірських, передгірних і рівнинних територій.

Отримані результати підтверджують доцільність використання порядків Стралера, площ суббасейнів і ширини долин як взаємодоповнювальних показників для аналізу річково-басейнових геосистем. Подальше уточнення результатів потребує залучення детальніших цифрових моделей рельєфу, гідрографічних даних і польової перевірки.

ORCID iD

Olha V. Palanychko <https://orcid.org/0000-0002-4407-4218>
 Dmytro I. Igonkin <https://orcid.org/0009-0009-6829-6091>

Список посилань

- Гродзинський, М. Д. (2005). *Пізнання ландшафту: місце і простір* (Т. 2). Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".
- Ігонькін, Д. (2025). Проблеми визначення перших порядків річок на прикладі річки Путилка. *Науковий вісник Чернівецького університету. Географія*. <https://doi.org/10.31861/geo.2025.853.93-100>
- ASF DAAC. (2014). *ALOS PALSAR high-resolution radiometric terrain corrected product [Data set]*. NASA Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- He, C., Yang, C.-J., Turowski, J. M., Ott, R. F., Braun, J., Tang, H., Ghantous, S., Yuan, X., & Stucky de Quay, G. (2024). A global dataset of the shape of drainage systems. *Earth System Science Data*, 16, 1151-1166. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1151-2024>
- Lindsay, J. B. (2016). The practice of DEM stream burning revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 658-668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., & Saleska, S. (2011). Height above the nearest drainage: A hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1-2), 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- Rosenfeld, A., & Pfaltz, J. L. (1966). Sequential operations in digital picture processing. *Journal of the ACM*, 13(4), 471-494. <https://doi.org/10.1145/321356.321357>
- Soille, P. J., & Ansoult, M. M. (1990). Automated basin delineation from digital elevation models using mathematical morphology. *Signal Processing*, 20(2), 171-182. [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(90\)90127-K](https://doi.org/10.1016/0165-1684(90)90127-K)
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Vincent, L., & Soille, P. (1991). Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6), 583-598. <https://doi.org/10.1109/34.87344>
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193-213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>

References

- ASF DAAC. (2014). *ALOS PALSAR high-resolution radiometric terrain corrected product [Data set]*. NASA Alaska Satellite Facility Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/Z97HFCNKR6VA>
- Grodzynski, M. D. (2005). *Piznannia landshaftu: mistse i prostir* [Cognition of landscape: Place and space] (Vol. 2). Kyiv University Publishing and Printing Center. [In Ukrainian].
- He, C., Yang, C.-J., Turowski, J. M., Ott, R. F., Braun, J., Tang, H., Ghantous, S., Yuan, X., & Stucky de Quay, G. (2024). A global dataset of the shape of drainage systems. *Earth System Science Data*, 16, 1151-1166. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1151-2024>
- Igonkin, D. (2025). Problemy vyznachennia pershykh poriadkiv richok na prykladni richky Putylka [Problems of determining the first orders of rivers: A case study of the Putylka River]. *Scientific Herald of Chernivtsi University. Geography*. <https://doi.org/10.31861/geo.2025.853.93-100> [In Ukrainian].
- Lindsay, J. B. (2016). The practice of DEM stream burning revisited. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5), 658-668. <https://doi.org/10.1002/esp.3888>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., & Saleska, S. (2011). Height above the nearest drainage: A hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1-2), 13-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- Rosenfeld, A., & Pfaltz, J. L. (1966). Sequential operations in digital picture processing. *Journal of the ACM*, 13(4), 471-494. <https://doi.org/10.1145/321356.321357>
- Soille, P. J., & Ansoult, M. M. (1990). Automated basin delineation from digital elevation models using mathematical morphology. *Signal Processing*, 20(2), 171-182. [https://doi.org/10.1016/0165-1684\(90\)90127-K](https://doi.org/10.1016/0165-1684(90)90127-K)
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Vincent, L., & Soille, P. (1991). Watersheds in digital spaces: An efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6), 583-598. <https://doi.org/10.1109/34.87344>
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193-213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>