



Проблеми визначення перших порядків річок на прикладі річки Путилка

Дмитро ІГОНЬКІН¹  <https://orcid.org/0009-0009-6829-6091>

УДК 911.2:556.5+004.94

ПОШУКОВА СТАТТЯ

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
кафедра географії України та регіоналістики

*Листування – ihonkin.dmytro@chnu.edu.ua

Ключові слова: річкова система, порядкові структури, метод Ржаніцина, метод Штралера, річки першого порядку, гідрографічне моделювання, дистанційне зондування, супутникові знімки, PALSAR, Sentinel-2, рельєфне моделювання, витоки річок, картографічний аналіз

Анотація: У статті досліджено особливості визначення річок першого порядку в гірських умовах на прикладі витоків річки Путилка (Чернівецька область). Використано порядкові методи Ржаніцина та Штралера для аналізу ієрархії річкової системи. Дослідження проводилося із застосуванням експедиційних даних, картографічних матеріалів, супутникових знімків Sentinel-2 та даних рельєфного моделювання (PALSAR). Для верифікації результатів також використовувалися зображення з карт Google.

Результати аналізу показали, що розбіжності між польовими даними, змодельованими потоками та картографічними матеріалами є незначними. Однак річки, які попередньо класифікувалися як першого порядку, у деяких випадках можуть належати до другого порядку.

Дослідження демонструє важливість комбінованого підходу, що включає дистанційне зондування, рельєфне моделювання та експедиційні дослідження. Це дозволяє підвищити точність ідентифікації річкових потоків та визначення їх порядків. Особливу увагу приділено вдосконаленню критеріїв класифікації річок першого порядку для мінімізації.

1. ВСТУП

Для того щоб отримати основні характеристики потоку і русла і прослідкувати за їх змінами при переході від малої річки до великої необхідно мати чіткі критерії для того щоб присвоїти деякому потоку його порядок. Розробка такої структури почалася з робіт Гравеліуса в 1914 році ([Gravelius, H. 1914](#)). За його методологією головне річище має порядок 1 від витoku до місця впадання, при цьому кожна притока має порядок збільшений на 1. Схожа модель була запропонована Хортоном в 1945 році ([Horton, 1945](#)). За моделлю Хортон найменші порядки відносяться до витоків річки, але застосовуються до всієї системи загалом, а не до окремих сегментів чи ланок. Порядок будь-якого каналу залишається незмінним від джерела до того моменту, коли він "вимирає" у вище розташованому сегменті або на виході з басейну. Головний сегмент басейну отримує порядок усього басейну, тоді як його притоки отримують порядок своїх підбасейнів. Обидва методи визначення річкової

2025, 853; DOI: <https://doi.org/10.31861/geo.2025.853.93-100>

<https://geochnu.top/>

Open Access. © 2025 Д. ІГОНЬКІН

опубліковано у Чернівецькому національному університеті

Ця робота ліцензується відповідно до

CC BY-NC-ND із Зазначенням Авторства – Некомерційна – Без Похідних 4.0 Міжнародна



структури найкраще підходять для того щоб визначити на скільки далеко річка знаходиться від «головного» русла але не відображають морфології річної долини, оскільки головне русло безперечно буде змінюватися.

З подальших досліджень порядкової структури річкової системи можна виділити порядкові структури Ржаніцина та Штралера (**Strahler, A. N. 1957**), згідно яких головний канал не визначається, замість цього порядок встановлюється на основі ієрархії приток. В порядку за Штралером витоки річки мають перший порядок, коли дві річки з різним порядком зливаються утворена річка має порядок, який дорівнює максимальному порядку двох річок. При злитті двох річок однакового порядку – утворена річка має порядок на одиницю більший ніж річки, які зливаються.

В 1966 році Рандольф Шреве вніс зміни в систему Штралера (**Shreve, R., 1966**). За системою Шреве при злитті двох річок утворена річка має порядок що дорівнює сумі порядків річок що зливаються.

Порядки Штралера та Шреве мають міцне математичне підґрунтя та широко використовуються при вивченні річкових систем, однак визначення порядкової структури залежить від точності визначення перших порядків річок. В даній роботі буде показані проблеми, що впливають на точність такого визначення.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

На разі найбільш популярними методами досліджень морфології річкових систем, та, зокрема, перших порядків є такі методи:

1. Експедиційний метод. Експедиції з використанням високоточних електронних приладів, таких як лазерні дальноміри, GNSS системи, що дозволяє з великою точністю картографувати невеликі ділянки русла. Даний метод є найбільш точним, але він є найбільш трудомісткий, оскільки річки перших порядків як правило мають меншу доступність, тому можна дослідити обмежену кількість річок.

2. Картографічний метод. Даний метод заключається у використанні існуючих мап. Даний метод дозволяє швидко обробити великий масив інформації, але не дозволяє бути впевненим в точності результату, особливо щодо річок перших порядків.

3. Дистанційне зондування Землі. Цей метод включає аналіз даних отриманих з супутників та інших літальних апаратів. Оскільки для регіону Карпат дані літальних апаратів є не доступними, в даній роботі будуть аналізуватися доступні дані з орбітальних апаратів.

Орбітальні апарати дистанційного зондування Землі, як правило, мають один, або декілька інструментів для власне зондування. Ці інструменти поділяються за використовуваною частотою хвилі, та за типом знімання.

За типом знімання апарати бувають активні (радар, які сприймають власне відбите випромінювання), та пасивні (які не випромінюють а просто сприймають випромінювання в якомусь діапазоні) (**Prof. Dr. Peter Kogut**).

За використовуваною частотою розрізняють апарати які працюють на низьких частотах та тих які працюють на високих включаючи ультрафіолетові та рентгеновське випромінювання. Як правило активні інструменти використовують меншу частоту ніж пасивні, які працюють в видимому та інфрачервоному діапазонах. Чим менша частота, та, відповідно більша довжина хвилі тим більші об'єкти вона може уникати (проходити через рослинність), але тим менша роздільна здатність отриманих знімків.

В даному дослідженні буде скомпоновано дані активного та пасивного вимірювання з орбітальних апаратів та порівняно з експедиційними даними та доступними мапами.

Джерелом даних активного зондування Землі було вибрано дані проєкту радіометричної корекції рельєфу (RTC) супутникового центру Аляски (ASF). Цей проєкт мав на меті зробити дані SAR доступними для ширшого кола користувачів, усуваючи геометричні та

радіометричні спотворення, властиві синтетичній апертурній радіолокації (SAR). Скориговані дані PALSAR надаються у форматі GeoTIFF, сумісному з ГІС ([ASF DAAC 2015](#)).

Випуск продуктів ALOS PALSAR RTC розпочався у жовтні 2014 року і був завершений через рік. Дані, використані в проєкті RTC, включали сцени Fine Beam (FBS, FBD) та Polarimetric (PLR) для всіх глобальних наземних територій, за винятком Антарктиди, Гренландії, Ісландії та північної Євразії. Даний продукт має найбільшу роздільну здатність з доступних на сьогодні (12,5 м на піксель)

Для пасивного зондування були вибрані знімки Sentinel-2 рівня 2A. Місія Copernicus Sentinel-2 складається з двох супутників, що обертаються по полярній орбіті, розташованих в одній сонячно-синхронній орбіті з фазовим зсувом 180° один від одного. Вона спрямована на моніторинг змін умов поверхні Землі, а її широка смуга захоплення (290 км) і висока частота повторного відвідування (10 днів на екваторі з одним супутником і 5 днів з двома супутниками, що призводить до 2-3 днів на середніх широтах) підтримуватимуть моніторинг змін поверхні Землі. Продукт рівня 2A надає атмосферно скориговані зображення відбивної здатності поверхні (SR), отримані з відповідних продуктів рівня 1C. Атмосферна корекція зображень Sentinel-2 включає корекцію розсіювання молекул повітря (розсіювання Релея), поглинання та розсіювання атмосферних газів, зокрема озону, кисню та водяної пари, а також корекцію поглинання та розсіювання аерозольних частинок.

Також порівнюємо дані отримані з Sentinel-2 з даними отриманими з публічних супутникових знімків Google.

Районом дослідження виступив район витоків річки Путилка біля села Плоска Чернівецької області, де було проведено експедиційне дослідження.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

За допомогою цифрової моделі висот, створеної на основі даних місії PALSAR, можна побудувати тривимірну модель рельєфу, яка дозволяє детально аналізувати особливості досліджуваної річки. На моделі чітко простежуються дві стадії розвитку річкового русла. Річка починається з водозбірної лійки, яка має розгалужену структуру та відсутність чіткого основного русла, і переходить у стадію з виразно сформованим руслом (*рис. 1*). У зоні водозбірної лійки складно визначити основне русло або з'ясувати, чи є воно єдиним. Крім того на знімку видно, що лійка є неоднорідною і включає декілька окремих потоків, які формують різні руслові структури.

Згідно з методом визначення потоків першого порядку, запропонованим Ржиніциним, потік першого порядку характеризується здатністю формувати власну долину в результаті своєї діяльності, при цьому наявність постійного водотоку не є обов'язковою умовою.

Ржиніцин виділяє кілька стадій формування потоків першого порядку. Перша форма — схиловий або площинний стік, який виникає внаслідок весняного танення снігу або зливових опадів і виглядає як суцільний шар води. Насправді цей стік формується численними малопомітними струмками, що настільки густо вкривають поверхню, що його умовно можна вважати площинним. Однак ця форма стоку спостерігається лише на вузькій смузі, що безпосередньо прилягає до вододілу.

Далі, на певній відстані від вододілу, дрібні струмки починають групуватися у більші, здатні інтенсивно розмивати поверхню схилу. Внаслідок цього формується характерна поверхня схилу з борознами — друга форма поверхневого стоку.

Ще далі струмки об'єднуються у більші потоки, що посилюють свою ерозійну здатність. У періоди весняного танення снігу або під час злив вони утворюють потужний потік, який створює свою долину як первинне морфологічне утворення, що надалі визначає напрямок стоку схилом. Проте діяльність такого потоку є епізодичною й проявляється лише за умов значного надходження вологи. У решту часу долина залишається сухою.

Д.Ігонькін

Проблеми визначення перших порядків річок на прикладі річки Путилка



Рис. 1. Візуалізація рельєфу

Схожий підхід до визначення потоків першого порядку був у Хортон ([Horton, 1945](#)). Підхід Хортон до аналізу руслових систем ґрунтувався на використанні топографічних карт як основного джерела інформації, а не лише даних польових досліджень. Особливу увагу він приділяв потокам першого порядку, наголошуючи, що вони не обов'язково є постійними водотоками. Хортон підкреслював, що на картах великого масштабу слід враховувати як постійні, так і тимчасові потоки, оскільки їх виключення може суттєво спотворювати оцінку густоти річкової мережі.

Він зазначав, що тимчасові потоки відіграють ключову роль у формуванні русел і долин, особливо під час повеней, коли відбувається основний транспорт води та осаду. Крім того, багато потоків першого порядку мають тимчасовий або епізодичний характер у верхів'ях, де ще не досягнуто рівня ґрунтових вод. Хортон підкреслював необхідність врахування цих потоків при визначенні густоти річкової мережі, оскільки вони є невід'ємною частиною її структури та динаміки.

Використовуючи модель рельєфу, можна ідентифікувати такі потоки.

Під час експедиційного дослідження, була спроба виміряти параметри річок першого порядку. Оскільки, гірська місцевість є дуже важкою для дослідження було прийнято рішення не проходити до витоків річки, а натомість використати наявні картографічні дані. Відповідно на наступному рисунку ([рис. 2](#)) ми можемо бачити точки, які були позначені як початки перших порядків, відповідно до картографічних даних, накладених на модель рельєфу.

На основі малюнка видно, що картографічні дані не відповідають змодельованому рельєфу. Для аналізу річкових потоків на даній моделі рельєфу використаємо геоінформаційну систему QGIS версії 3.43. Ця система є безкоштовною для академічного використання та широко застосовується в подібних дослідженнях.

Моделювання потоків виконується у два етапи:

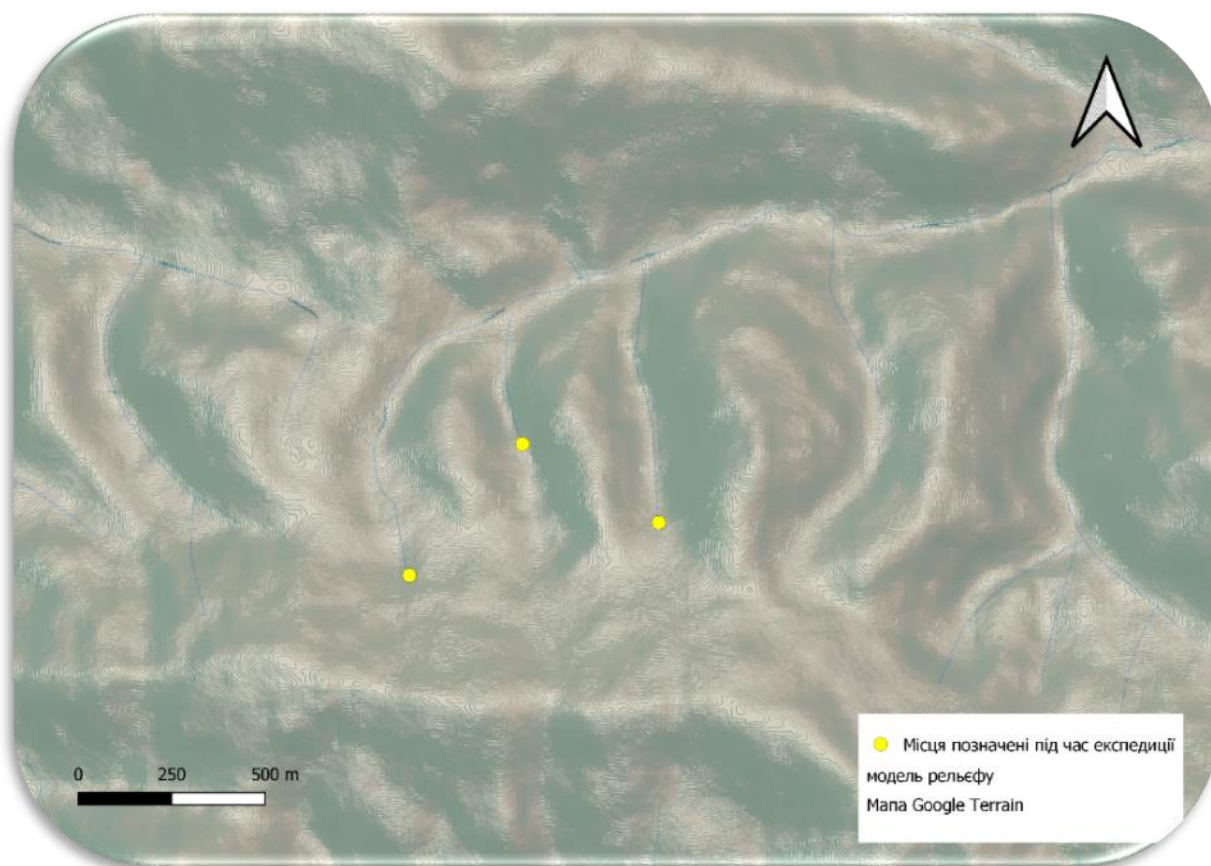


Рис. 2. Картографічні дані з моделлю рельєфу

Підготовка моделі рельєфу: Використовуємо інструмент Fill Sinks (Wang & Liu), який реалізує алгоритм Ванга та Ліу (L. WANG and H. LIU 2005), для створення моделі висот без депресій.

Побудова потоків: На основі отриманої моделі рельєфу застосовуємо інструмент Flow Accumulation, що використовує алгоритм Deterministic 8 (O'Callaghan, J.F. / Mark, D.M. 1984). Для визначення потоків обираємо мінімальне порогове значення площі водозбору $0,7 \text{ км}^2$, встановлене експериментально за результатами польових досліджень.

В результаті отримуємо наступний рисунок.

Як бачимо з рисунку (рис. 3), потоки, які вважалися потоками першого порядку, можуть насправді бути потоками другого порядку.

Для аналізу води на супутникових знімків, як правило використовують різні види індексів, такі як NDWI (нормалізований водний індекс), AWEI (автоматичний індекс визначення води), NDII (нормалізований інфрачервоний індекс), MLSWI (модифікований індекс для поверхневих вод) (Li, J.; Ma, R.; Cao, Z.; Xue, K.; Xiong, J.; Hu, M.; Feng, X 2022). Дані індекси використовують знімки різних спектрів дистанційного зондування Землі. Проблема полягає в тому що найкращі мультиспектральні дані вільно доступні для користування мають роздільну здатність 10м на піксель, тому дані індекси не знаходять річки нижчих порядків.

Знімки доступні на платформі Google Maps не є мульти спектральними, тому загальноприйняті індекси не будуть на них працювати, але зате вони мають роздільну здатність до 50 см на піксель, що є в 20 раз краще. І хоча на даних знімках практично не можна розрізнити воду – на них чітко видно зміни в лісовому покриві. Ці зміни зумовлені ярами, які можуть позначати річкові долини.

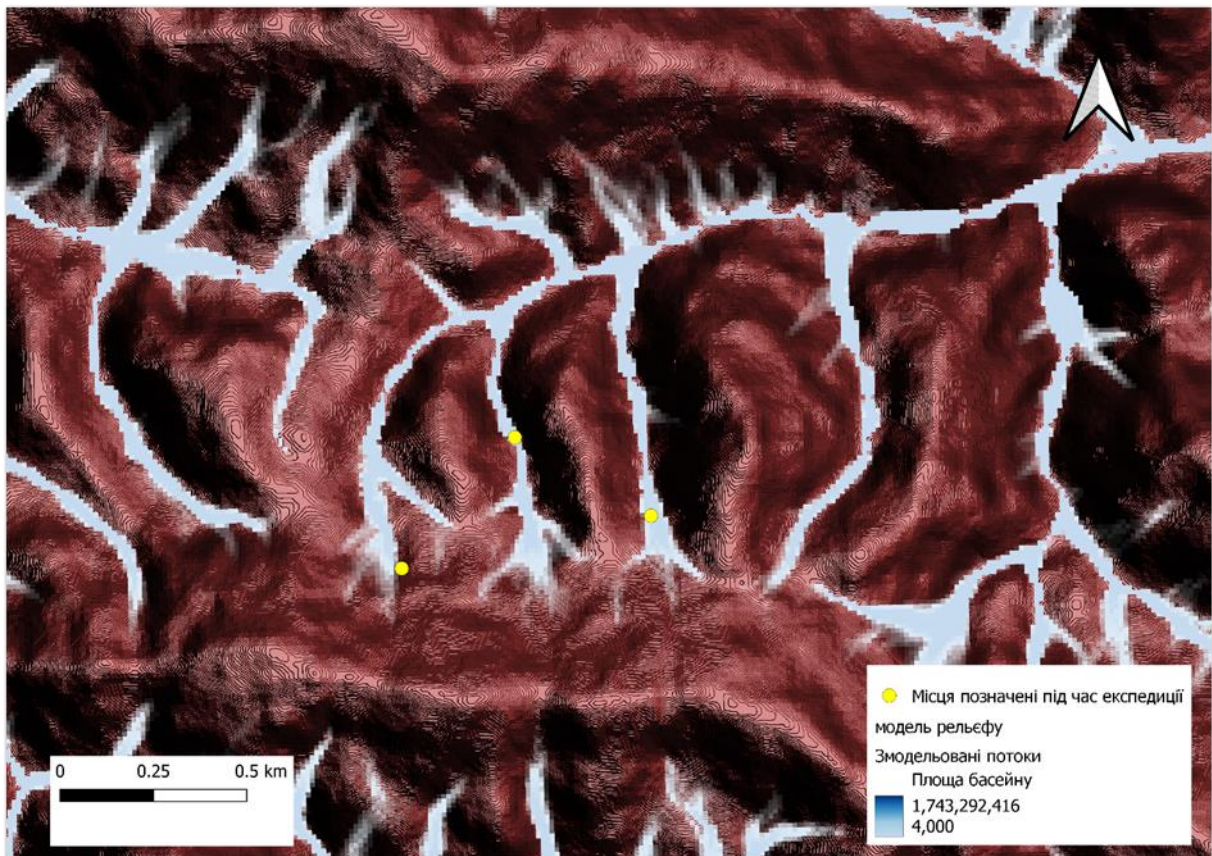


Рис. 3. Змодельовані потоки

Обвівши зміни в лісовому покриві отримаємо наступний рисунок (рис. 4):

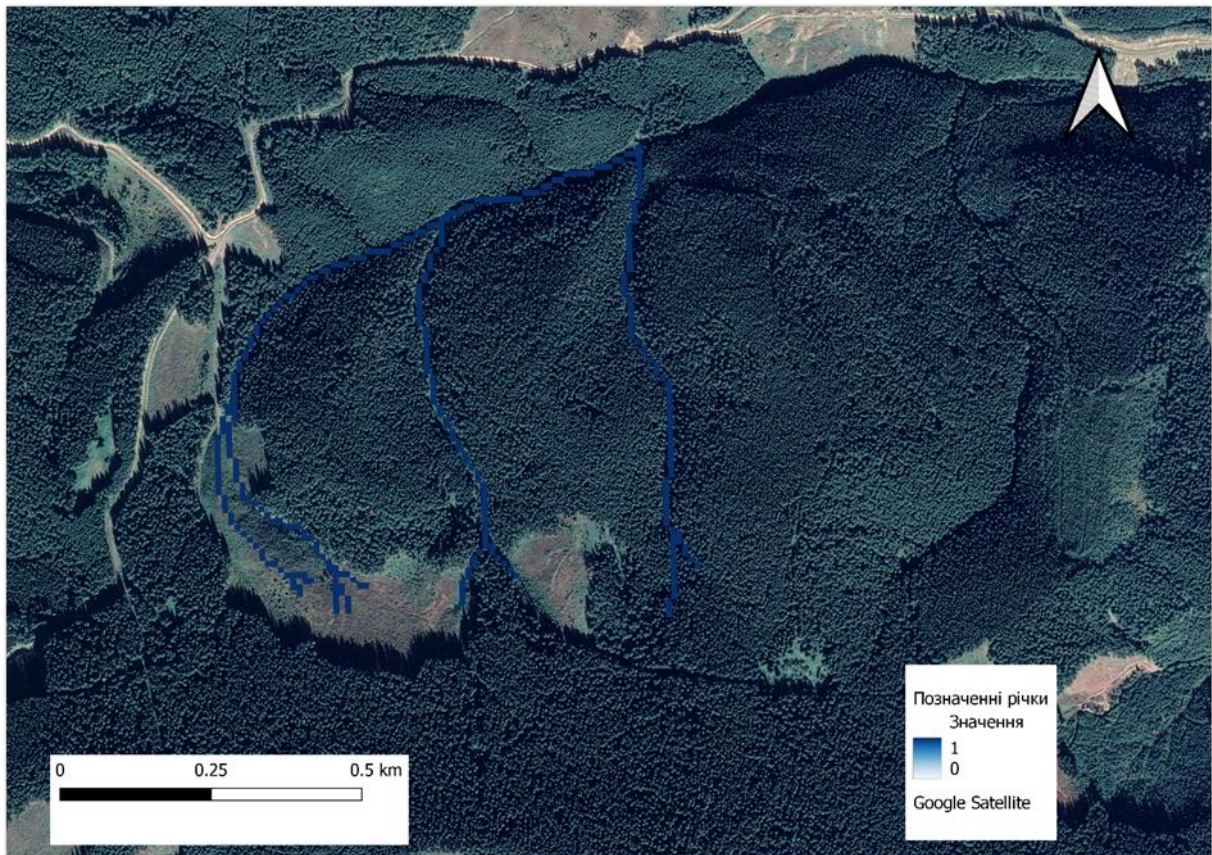


Рис. 4. Обведені контури зміни лісового покриву

Д.Ігонькін

Проблеми визначення перших порядків річок на прикладі річки Путилка

Недоліком такого методу є його низька точність, оскільки з річковими долинами можуть виділятися також дороги. Але даний метод може бути корисний при його поєднанні з моделюванням рельєфу та експедиційними дослідженнями.

Поєднавши оптичне дослідження з даними моделювання рельєфу отримаємо наступний результат:

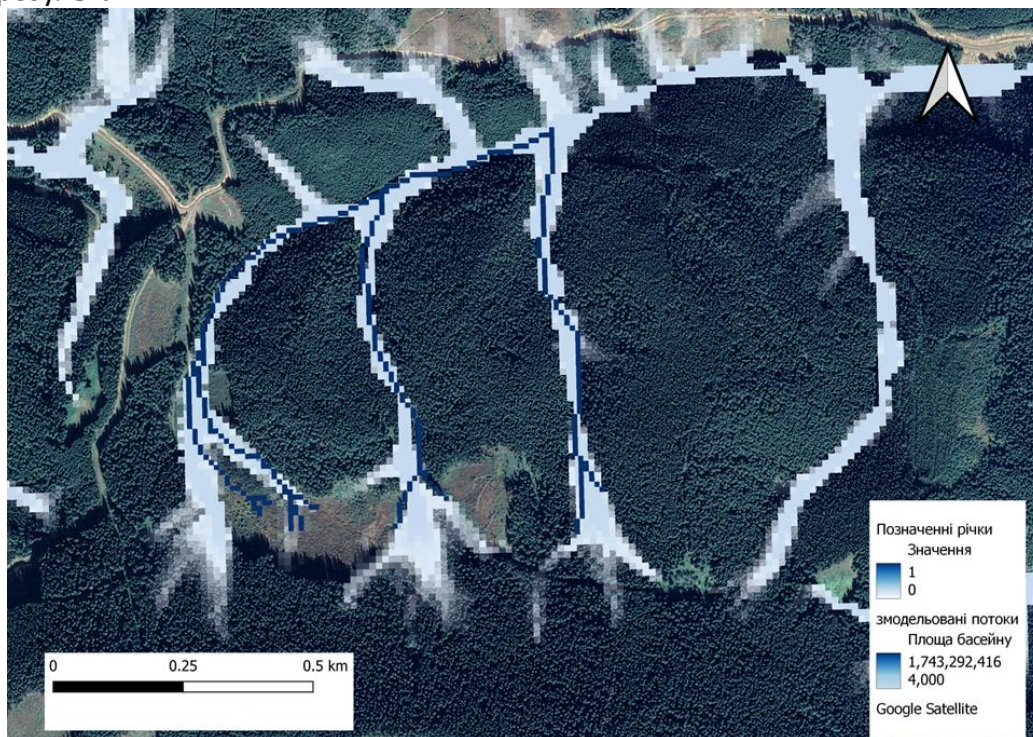


Рис. 5. Поєднання методів

Як бачимо, на даному рисунку (рис. 5) результат оптичного розпізнавання є близьким до результату моделювання та до картографічних даних, хоча витoki показують дещо інший результат.

4. ВИСНОВКИ

Проведене дослідження показало, що метод оптичного розпізнавання загалом корелює з даними рельєфного аналізу, що підтверджує його доцільність для підвищення точності моделювання. Разом із тим, аналіз моделі рельєфу та результати візуальних спостережень свідчать, що річки, які попередньо класифікували як першого порядку, нерідко виявляються річками другого порядку. Ідентифікація річок першого порядку залишається складним завданням, особливо через важкодоступність місцевості, що потребує досліджень безпосередньо в руслі, яке важко пройти навіть під час експедицій.

Картографічні матеріали також виявляються недостатньо об'єктивними у відображенні річок першого порядку, що підкреслює важливість додаткових підходів, зокрема оптичного розпізнавання. На цей час аналіз ярів за допомогою оптичного розпізнавання вимагає значної кількості ручної роботи, однак подальший розвиток автоматизації цього процесу є необхідним для зменшення похибки та підвищення ефективності досліджень.

Додатково виникає необхідність покращити критерії визначення річок першого порядку, аби чіткіше розмежовувати їх від ярів чи інших ландшафтних утворень. Це допоможе усунути неоднозначність у класифікації і покращить точність моделювання гідрографічних об'єктів.

Для досягнення більш точних результатів потрібна більша кількість експедиційних даних, які не лише сприятимуть вдосконаленню методів аналізу, але й забезпечать надійну базу для валідації автоматизованих алгоритмів. Це підкреслює важливість синтезу польових

Д.Ігонькін

Проблеми визначення перших порядків річок на прикладі річки Путилка

досліджень, сучасних технологій та удосконалення підходів до класифікації річок для успішного вирішення задач гідрографічного моделювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Gravelius, H. (1914)** Morphometry of Drainage Bassins. Elsevier, Amsterdam.
2. **Horton, R. E. (1945)**, Erosional development of streams and their drainage basins: hydro-physical approach to quantitative morphology, Geological Society of America Bulletin 56 (3): 275-370
3. **Strahler, A. N. (1957)**, Quantitative analysis of watershed geomorphology, Transactions of the American Geophysical Union 8 (6): 913-920.
4. **Shreve, R., (1966)**, Statistical Law of Stream Numbers, J. Geol., 74, 17-37.
5. **Prof. Dr. Peter Kogut**, <https://eos.com/blog/types-of-remote-sensing/>
6. **ASF DAAC 2015**, ALOS PALSAR_Radiometric_Terrain_Corrected_hi_res; Includes Material ©JAXA/METI 2007.
7. **Li, J.; Ma, R.; Cao, Z.; Xue, K.; Xiong, J.; Hu, M.; Feng, X (2022)**. Satellite Detection of Surface Water Extent: A Review of Methodology. Water 2022, 14, 1148. <https://doi.org/10.3390/w14071148>
8. **L. WANG and H. LIU (2005)**, An efficient method for identifying and filling surface depressions indigital elevation models for hydrologic analysis and modelling, International Journal of Geographical Information ScienceVol. 000, No. 000, 0 Month 2005, 1–21
9. **O'Callaghan, J.F. / Mark, D.M. (1984)**: 'The extraction of drainage networks from digital elevation data',Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28:323-344.

D. Igonkin

Problems of determining the first orders of rivers using the example of the Putilka River

Keywords: river system, ordinal structures, Rzhnitsyn method, Strahler method, first-order rivers, hydrographic modeling, remote sensing, satellite imagery, PALSAR, Sentinel-2, terrain modeling, river sources, cartographic analysis

Abstract: This article examines the challenges of identifying first-order rivers in mountainous conditions using the sources of the Putylka River (Chernivtsi region) as a case study. The Rzhnitsyn and Strahler ordinal methods were used to analyze the hierarchy of the river system. The research was conducted using expedition data, cartographic materials, Sentinel-2 satellite images, and terrain modeling data (PALSAR). Google Maps imagery was also used for result verification.

The analysis results showed that discrepancies between field data, modeled streams, and cartographic materials were minimal. However, rivers initially classified as first-order may, in some cases, belong to the second order.

The study highlights the importance of a combined approach that includes remote sensing, terrain modeling, and field research. This approach improves the accuracy of river flow identification and order determination. Special attention is given to refining the classification criteria for first-order rivers to minimize errors in hydrographic modeling..