

Порівняльний аналіз методів побудови порядкової структури річкових систем на прикладі річки Сірет з використанням даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій

Дмитро ІГОНЬКІН^{1*}  <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: ГІС, порядок річок, гідрологія, Штралер, Шреве, Гравеліус, Хортон, річка Сірет, дані дистанційного зондування Землі.

Анотація: У роботі розглянуто побудову порядкувої структури річкових систем за методами Гравеліуса, Хортонна, Штралера та Шреве на прикладі річки Сірет. Для побудови моделі річкової системи були використані данні із супутника ALOS-2, який використовує інструмент PALSAR, що працює на довжині хвилі 23,8 см. Для побудови моделі річкової системи використовувалась геоінформаційна система QGIS.

Після побудови порядкувої структури річок за методами Гравеліуса, Хортонна, Штралера та Шреве стало зрозуміло принцип розвитку систем порядків. Системи Гравеліуса та Хортонна є логічними та зрозумілими з топологічної точки зору, оскільки вони дають можливість визначити головну річку басейну на всій її довжині. Натомість системи Штралера та Шреве є більш логічними та зрозумілими з математичної точки зору, оскільки вони побудовані з використанням теорії графів.


Враховуючи це, стає зрозумілим розвиток систем визначення порядкувої структури річок: від системи, яку легко використовувати людині, до системи, яка є більш зрозумілою для обчислювальної техніки.

1. ВСТУП

Річкова сітка поділяється на окремі частини, звані річковими системами. Ці системи включають головну річку та її притоки, або всі річки певної території, що об'єднують свої води до головної річки, яка відводить їх за межі цієї території. Зазвичай, при злитті двох приток головною вважається та, яка має більший стік води, однак це правило деколи порушується, що пов'язано з історією виникнення назв річок, їх довжиною та іншими особливостями (Ющенко 2017).

Упродовж ХХ століття методологія побудови порядкувої структури річок зазнала значних змін. Спочатку використовувалися простіші підходи, засновані на емпіричних спостереженнях і ручному аналізу карт. З розвитком технологій і науки, зокрема геоінформаційних систем (ГІС), з'явилися нові можливості для більш точного і ефективного аналізу річкових систем.

2024, 849; DOI: <https://doi.org/10.31861/geo.2024.849.12-18>

 Open Access. © 2024 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



Метою цієї статті є демонстрація методів побудови різних порядків річок за допомогою ГІС. Ми розглянемо, як використовувати ці системи для аналізу річкових мереж. Особливу увагу приділено алгоритмам, що дозволяють автоматично визначати річкові порядки на основі цифрових моделей рельєфу.

Крім того, в статті буде проведено порівняння різних методів визначення річкових порядків. Зокрема, ми розглянемо підходи, запропоновані Хаком, Гравеліусом, Штралером та Шреве. Кожен із цих методів має свої особливості та застосовується в різних контекстах. Наприклад, метод Хака фокусується на геометричних властивостях річкових систем, тоді як метод Штралера базується на топологічних характеристиках.

Порівняння цих методів дозволить краще зрозуміти їх переваги та обмеження, а також вибрати найбільш підходящий підхід для конкретних завдань. Ми також розглянемо практичні приклади застосування кожного методу на прикладі річки Сірет.

2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для того щоб побудувати модель річкової системи необхідно отримати дані по річковій системі в цифровому вигляді. Це можна зробити оцифрувавши наявні мапи, або створити нову модель використовуючи дані дистанційного зондування Землі та експедиційні дослідження. В даній статті ми будемо використовувати супутникові знімки.

Виділяють два типи супутникових інструментів для дослідження поверхні землі: активні та пасивні (Kogut 2020). Активні інструменти, такі як радари, лідари, лазерні альтиметри, ехолотатори використовують своє джерело випромінювання, тоді як пасивні, наприклад спектрометри, радіометри, акселерометри можуть вловлювати вже наявне випромінювання. В даному дослідженні ми будемо використовувати мапу висот для побудови моделі річкової системи, що вимагає використання саме радарів.

Супутникові радари можуть працювати на частотах від 2 МГц до 240 ГГц в залежності від мети (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2015). Чим більша частота, тим є більшою роздільна здатність радару та менше енергії необхідно для його роботи, з іншого боку, оскільки хвиля може долати перешкоди менше половини довжини хвилі, більша довжина хвилі дає можливість оминати перешкоди, такі як хмари, рослинність і т. д.

Завданням даної роботи є дослідження річки Сірет, тому нам необхідно отримати модель рельєфу, не враховуючи рослинність та інші перешкоди. Для цього будемо використовувати знімки, виконані інструментом з якомога більшою довжиною хвилі (тобто меншою частотою). На даний момент існують дві місії які ведуть дослідження з частотою 1,26 ГГц (23,8 см) це ALOS-2 від японського космічного агентства та SMAP від американського, хоча найближчим часом повинні будуть доступні знімки від місії ESA Biomass європейського космічного агентства, який працює на частоті 4,3 МГц (довжина хвилі 69,7 см) (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine 2015). В даній роботі будемо використовувати знімки з місії ALOS-2.

Наше завдання в даному дослідженні полягає в тому, щоб продемонструвати на прикладі річки Сірет обчислення порядків річок використовуючи різні методи – необхідно використовувати ГІС систему, яка має можливість це зробити. QGIS з використанням GRASS модуля має можливість зробити саме це за допомогою інструменту *r.stream.order*. (Jasiewicz 2023).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Побудова моделі річкової системи

Для того щоб побудувати рядкову модель русла інструмент *r.stream.order*. потребує матрицю схилів та матрицю річищ. Матриця схилів для кожної точки рельєфу вказує напрямом

Д. Ігонькін.

Порівняльний аналіз методів побудови рядкової структури річкових систем на прикладі річки Сірет з використанням даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій

стоку. Тобто це є число від 1 до 8, яке позначає на яку з сусідніх клітинок відбувається стік. Матриця річищ це є матриця, де тільки клітинки між схилами (там де може бути річка) будуть мати не нульове значення. В *QGIS* існує інструмент *r.stream.extract*, який використовуючи алгоритм *MFD* (алгоритм декількох напрямків потоків) (Metz 2023) будує вказані матриці.

Використовуючи даний інструмент на супутниковому знімку *AP_01762_FBS_F0950_RT1* отриманому під час місії *ALOS-2* отримаємо наступний рисунок (рис. 1):

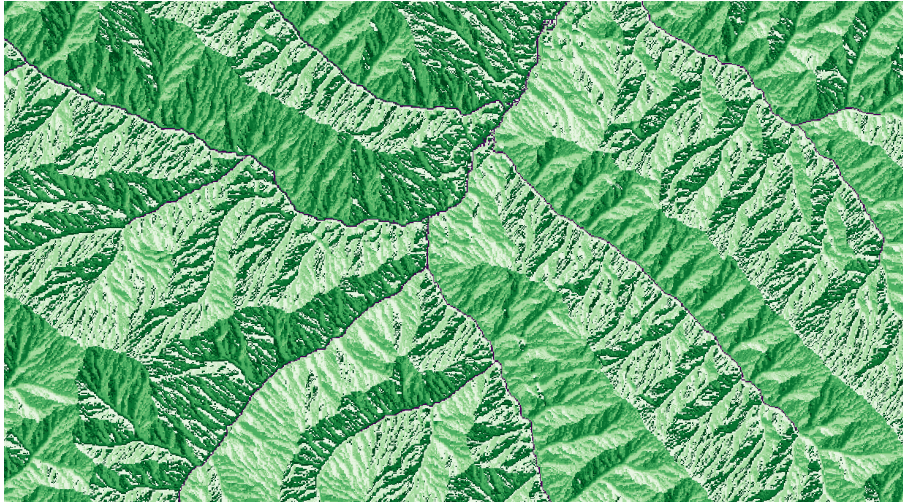


Рис. 1. Мапа схилів з ідентифікованими потоками

На ньому можемо бачити ідентифіковані схили позначені одним кольором в зеленій палітрі, та потоки на межі двох схилів позначених темним кольором.

Маючи мапу схилів та ідентифіковані потоки можна побудувати порядкову структуру річки за допомогою інструменту *r.stream.order*. Даний інструмент дозволяє побудувати річкову структуру використовуючи різні методи.

Після побудови порядкової структури річок необхідно:

- Вирізати зі знімку інші річки. Для цього необхідно побудувати басейн річки та видалити всі точки з порядкової структури, які не належать басейну.
- Перевести басейн річки в векторну форму для наочності показу. Це можна зробити за допомогою інструменту *r.to.vect*.

3.2. Порядкові структури річок

Найпершим визначенням порядкової структури річок є, так званий класичний порядок річок, також називається порядком Хака або порядком Гравеліуса був запропонований Гравеліусом в 1914 році (Gravelius 1914). За даним методом визначення порядків – головне річище має порядок 1 від витоків до місця впадання і збільшується на 1 з кожною притокою. Ця порядкова структура є логічною та корисною з топологічної точки зору, оскільки показує як далеко є притока від головної річки, але таку порядкову структуру складно будувати, оскільки при злитті двох річок не зрозуміло, яка з них була головною.

На рис. 2 товщина лінії позначає порядок річки, чим більший порядок тим товстіша лінія. Можемо бачити що перший порядок йде від витоків до кінця знімку. Алгоритм використовує евристику для визначення головного русла, використовуючи найдовшу річку як головну (Jasiewicz 2023).

Наступний порядок був запропонований Хортоном у 1945 році (Horton 1945). На відміну від класичного порядку, найменші порядки відносяться до витоків річки, але застосовуються

Д. Ігонькін.

Порівняльний аналіз методів побудови порядкової структури річкових систем на прикладі річки Сірет з використанням даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій

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. Цей порядок, як і порядок Хака, вимагає визначення, яка з двох приток є продовженням річки.

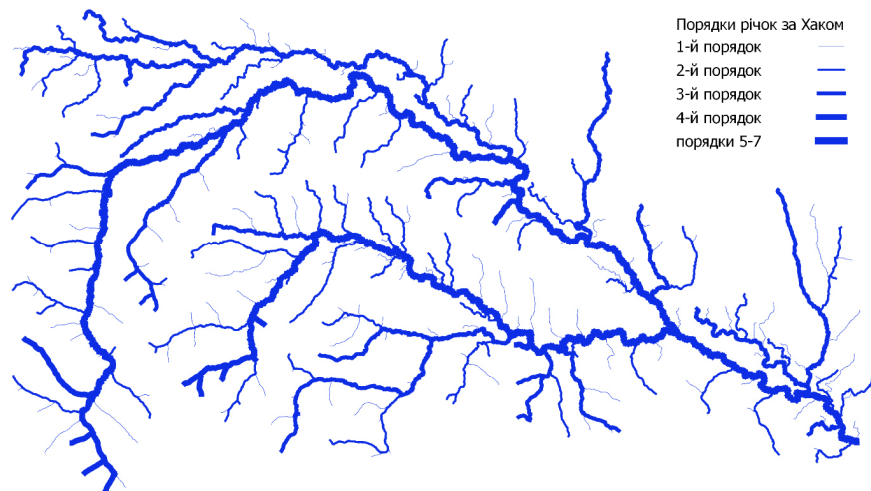


Рис. 2. Порядок р. Сірет за Хаком

На *рис. 3* товщина лінії позначає порядок річки, чим більший порядок тим товстіша лінія. Можемо бачити що тепер головне річище має найбільший порядок, при тому порядок зменшується чим далі від головного русла. На відміну від порядку за Хаком для порядку за Хортоном алгоритм використовує порядкову структуру за Штралером для визначення головного річища. Річище з більшим порядком за Штралером буде вважатися головною.

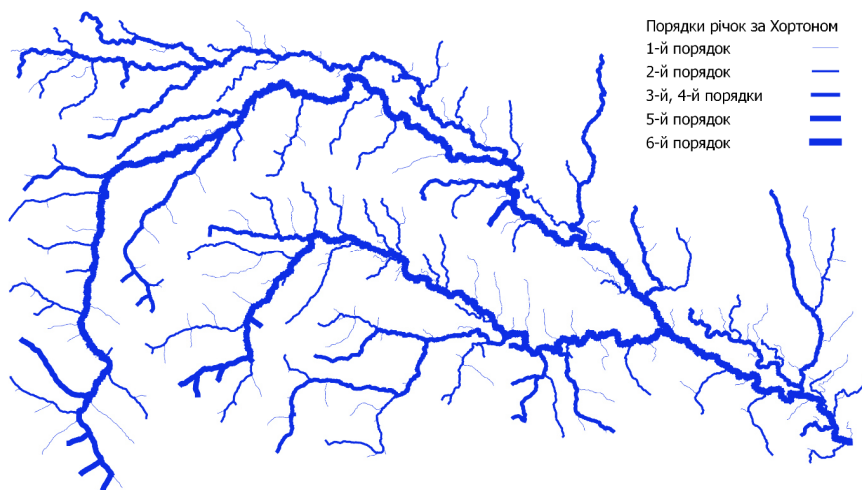


Рис. 3. Порядок р. Сірет за Хортоном

Для усунення неоднозначностей в моделі Хортон в 1957 р. Артур Ньювел Штралер запропонував свою модель ([Strahler 1957](#)). У системі Штралера головний канал не визначається; замість цього порядок встановлюється на основі ієрархії приток. Порядок річок за Штралером має міцні математичні основи. Усі водозбірні басейни з річками в цьому контексті можна розглядати як орієнтовані графи, спрямовані від кореня до листя.

Д. Ігонькін.

Порівняльний аналіз методів побудови порядкової структури річкових систем на прикладі річки Сірет з використанням даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій

Еквівалентне визначення числа Штралера для дерева полягає в тому, що це висота найбільшого повного бінарного дерева, яке може бути гомеоморфно вбудоване в задане дерево; число Штралера вузла в дереві відповідає висоті найбільшого повного бінарного дерева, яке може бути вбудоване під цим вузлом. Завдяки цьому порядок річок за Штралером широко використовується при вивченні річкових систем.

На *рис. 4* товщина лінії позначає порядок річки, чим більший порядок тим товстіша лінія. В порядку за Штралером витік річки має порядок 1, коли дві річки з різним порядком зливаються утворена річка має порядок, який дорівнює максимальному порядку двох річок. Якщо дві річки з однаковим порядком зливаються – утворена річка має порядок на одиницю більший ніж річки, які зливаються.

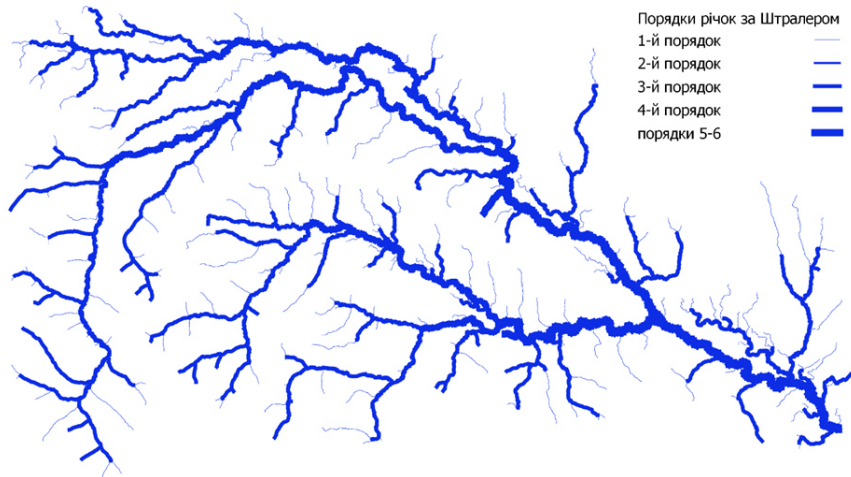


Рис. 4. Порядок р. Сірет за Штралером

В системі Штралера потоки з меншим порядком не впливають на порядок головної річки що приводить до втрати інформації, щоб усунути цю проблему Рандольф Шреве запропонував в 1966 році свою систему ([Shreve 1957](#)).

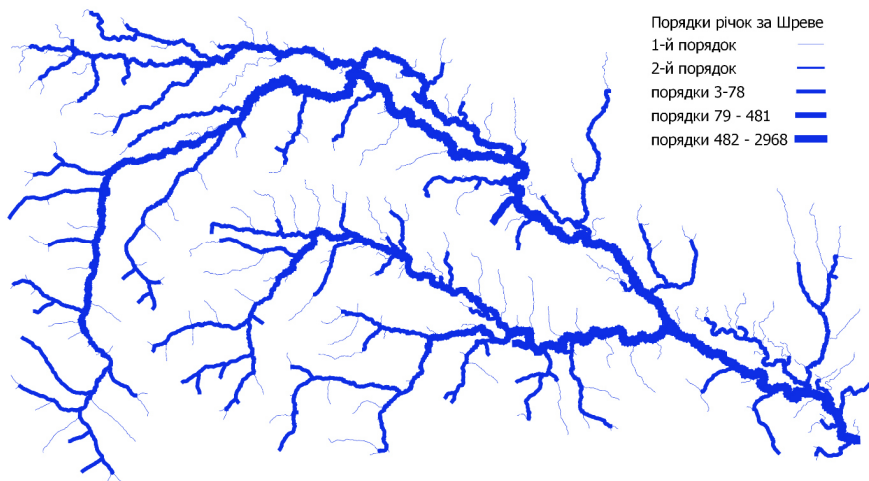


Рис. 5. Порядок р. Сірет за Шреве

На *рис. 5* товщина лінії позначає порядок річки, чим більший порядок тим товстіша лінія. Система Шреве також присвоює найменшим притокам номер "1". На відміну від

Д. Ігонькін.

Порівняльний аналіз методів побудови порядкової структури річкових систем на прикладі річки Сірет з використанням даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій

методу Штралера, при злитті приток номери додаються. Порядок потоків за системою Шреве вважається кращим у гідродинаміці: він підсумовує кількість джерел у кожному водозборі вище гідрологічного поста або виливу і приблизно корелює з обсягами розриву та рівнями забруднення. Подібно до методу Штралера, ця система залежить від точності включених джерел, але меншою мірою залежить від масштабу карти. Використовуючи відповідну нормалізацію, її можна зробити майже незалежною від масштабу, і в цьому випадку вона не залежить від точного знання верхніх та нижніх течій області.

4. ВИСНОВКИ

У даній статті показано, як за допомогою супутникових даних можна побудувати статичну модель річкової системи, достатню для визначення порядкової структури річкової системи. Використання супутникових знімків та геоінформаційних систем, зокрема *QGIS*, дозволяє значно спростити та автоматизувати процес аналізу річкових систем. На прикладі річки Сірет ми можемо простежити еволюцію підходів до вивчення річкових систем та розвитку географічної науки загалом.

Методи, застосовані у цій статті, добре підходять для побудови огляду річкової системи, але їм бракує точності. Оскільки вони базуються на моделі рельєфу, не всюди, де є два схили, між ними тече річка. Тому для точної побудови необхідні додаткові дослідження та польові роботи.

Супутникові дані та сучасні геоінформаційні системи дозволяють не тільки покращити точність та ефективність досліджень, але й значно розширити можливості аналізу річкових систем у різних географічних умовах. Для досягнення максимальної точності та достовірності моделей річкових систем необхідно поєднувати автоматизовані методи з польовими дослідженнями та додатковими джерелами даних.

На початку ХХ століття Гравеліус запропонував топологічний метод аналізу річкових систем, який вимагав значних польових досліджень для визначення головного русла і мав обмеження у випадках складної річкової мережі. Хоча Хортон удосконалив цей підхід, двозначність визначення порядків річок збереглася. Наприкінці ХХ століття Штралер і Шреве запропонували математичні підходи, засновані на теорії графів, що дозволило автоматизувати процес та уникнути двозначностей. Отже, можна побачити рух систем визначення порядків річок і географічної науки в цілому в бік більш точних математичних визначень.

Порівнюючи побудовані схеми на прикладі річки Сірет, можна помітити, що до впровадження методу Штралера існували значні відмінності між моделями. Однак після впровадження методів Штралера та Шреве, моделі стали значно більш узгодженими, з мінімальними відмінностями між ними (хоча розмір порядків відрізняється значно).

Також варто зазначити, що з 1966 року не було запропоновано нових методів визначення порядкової структури річкової системи, що може свідчити про те, що існуючі методології задовольняють поточні вимоги географічної науки і практики. Це також вказує на можливість подальшого вдосконалення та застосування сучасних технологій для більш ефективного аналізу річкових систем.

Таким чином, використання супутникових даних та сучасних геоінформаційних систем дозволяє не тільки покращити точність та ефективність досліджень, але і значно розширити можливості аналізу річкових систем у різних географічних умовах

ЛІТЕРАТУРА

1. Ющенко, Ю. С. (2017). *Загальна гідрологія : підручник*. Чернівці : Чернівецький національний університет. [Yushchenko, Yu. S. (2017). *Zahalna hidrolohiia : pidruchnyk*. Chernivtsi : Chernivetskyi natsionalnyi universytet.]

Д. Ігонькін.

Порівняльний аналіз методів побудови порядкової структури річкових систем на прикладі річки Сірет з використанням даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій

2. **Gravelius, H.** (1914) *Morphometry of Drainage Bassins*. Elsevier, Amsterdam.
3. **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.
4. **Shreve, R.** (1966). *Statistical Law of Stream Numbers*, *J. Geol.*, (74), 17-37.
5. **Strahler, A. N.** (1957), Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 8(6), 913-920.

ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ

6. **Jasiewicz, J.** (2023). *Open Source Geospatial Foundation documentation*. [Джерело](#)
7. **Kogut, P.** (2020). *Types Of Remote Sensing: Technology Changing The World*. [Джерело](#)
8. Metz, M. (2023). *Open Source Geospatial Foundation documentation*. [Джерело](#)
9. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine* (2015). *A Strategy for Active Remote Sensing*. Increased Demand for Radio Spectrum. Washington, DC: The National Academies Press. [Джерело](#)

D. Ihonkin

Comparative analysis of methods for building the order structure of river systems on the example of the Siret River using data from remote sensing of the Earth and GIS technologies

Keywords: GIS, stream order, Gravelius, Horton, Strahler, Shreve, satellite, Siret river.

Abstract: This study investigates the hierarchical structure of river systems using the methods of Gravelius, Horton, Strahler, and Shreve, with the Siret River as a case study. Data from the ALOS-2 satellite, utilizing the PALSAR instrument at a 23.8 cm wavelength, were used for model construction through the geographic information system QGIS.

The analysis highlighted the principles of stream order system development by constructing the hierarchical structure of rivers using the methods of Gravelius, Horton, Strahler, and Shreve. Gravelius and Horton's systems are logical and comprehensible from a topological perspective, facilitating the identification of the main river of the basin along its entire length. In contrast, Strahler and Shreve's methods, based on graph theory, are more mathematically logical and understandable.

This study demonstrates how satellite data can be used to construct a static model of a river system, sufficient for determining its hierarchical structure. The use of satellite imagery and geographic information systems like QGIS significantly simplifies and automates the analysis process. However, the methods applied in this study are well-suited for an overview of the river system but lack precision. This is because they rely on a relief model, which does not always accurately indicate where rivers flow between slopes. Therefore, additional studies and fieldwork are necessary for precise modeling.

The study of the Siret River exemplifies the evolution of approaches to analyzing river systems and the overall advancement of geographic science. Although modern methods have reduced ambiguities and are well-adapted to automation and large data processing, there is still a need for further refinement and the integration of contemporary technologies for more accurate analysis across various geographic conditions.

Д. Ігонькін.

Порівняльний аналіз методів побудови порядкової структури річкових систем на прикладі річки Сірет з використанням даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій