

6. Sarnavskiy S. P. Characterization of the physical and geographical conditions of the formation of the flow of the rivers of the left bank of the Middle Dnipro. Modern aspects of natural science research in the context of sustainable development of society : Scientific monograph. Riga : Baltija Publishing, 2023. P. 377–414. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-395-8-20>.

7. Yermakov V. V., Sarnavskiy S. P. The river network of the city of Poltava: retrospection and modernity. Scientific and educational dimensions of natural sciences : Scientific monograph. Riga : Baltija Publishing, 2023. P. 457–479. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-289-0-21>.

**Typical hydrograph of runoff from the left tributaries of the Middle Dnipro and its long-term dynamics  
Sarnavskiy S.P., Grebin V.V., Yermakov V.V.**

*The article presents a comprehensive analysis of the long-term changes in the typical hydrograph of runoff from the left tributaries of the Middle Dnipro over the period from 1931 to 2020. The main objective of the study is to identify long-term changes in the distribution of runoff throughout the year and to establish trends caused by natural and anthropogenic factors. To achieve this goal, statistical methods of processing primary data from hydrological observations were used, allowing the identification and analysis of the characteristic features of river runoff formation in the region during different climatic periods: 1931–1960, 1961–1990, and 1991–2020.*

*The study results showed that the rivers of the left bank of the Middle Dnipro are characterized by typical runoff features inherent to Eastern European rivers. Four main phases were identified: spring flood, summer-autumn low water, autumn rain floods, and winter low water. The analysis of changes in the seasonal runoff distribution revealed a steady trend of decreasing spring runoff, which averaged 73% in 1931–1960 but dropped to 44% in 1991–2020. This indicates a leveling of the intra-annual runoff distribution, which manifests as an increase in its share in summer, autumn, and winter.*

*The primary cause of these changes is the transformation of climatic conditions in the region. In particular, winter season warming has been noted, leading to a shorter period of stable snow cover, a decrease in solid precipitation, and an increase in the number of winter rains. This, in turn, results in reduced spring runoff and redistribution of water resources throughout the year. Anthropogenic impacts also play a significant role, including changes in water-regulating structures, deforestation, and wetland drainage, which further affect the runoff regime of rivers.*

**Keywords:** typical runoff hydrograph, Middle Dnipro basin, left tributaries.

**Надійшла до редколегії 03.12.2024**

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.4.3>

УДК 556.5+528.8

**Пасічник М.Д.**

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

**ГІС-МОДЕЛЮВАННЯ ВОДОЗБІРНОГО БАСЕЙНУ ТА РІЧКОВОЇ МЕРЕЖІ:  
АНАЛІЗ ГІДРОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА ПРИКЛАДІ БАСЕЙНУ РІЧКИ БРУСНИЦЯ**

*Дослідження басейну річки Брусниця демонструє ефективність використання сучасних ГІС-технологій для аналізу водозбірних систем, що є актуальним у контексті змін клімату та активного антропогенного впливу. Малим річкам відводиться важлива роль у підтримці екологічної рівноваги, забезпеченні водопостачання, підтримці біорізноманіття та формуванні локальних екосистем. Однак вони є вразливими до змін кліматичних умов, забруднення та нераціонального використання, що зумовлює необхідність детального моніторингу та розробки ефективних стратегій управління. Основною метою дослідження було моделювання водозбірного басейну та річкової мережі річки Брусниця із застосуванням цифрових моделей рельєфу та ГІС-інструментів. Використання програмного забезпечення QGIS 3.22 та SAGA GIS 2.3.1 дозволило отримати точні просторові характеристики, визначити напрямки потоків, водозбірні межі та ієрархію річкової мережі, що сприяє підвищенню точності прогнозування паводків, оцінки ерозійних процесів та розробки заходів збереження водних ресурсів.*

*Для дослідження використовувалися цифрові моделі рельєфу, зокрема Copernicus Global Digital Elevation Model з роздільною здатністю 30 метрів, топографічні карти, супутникові зображення та гідрологічні дані. Алгоритми Fill Sinks (Wang & Liu), Flow Direction, Flow Accumulation, Catchment Area, Drainage Basins та Strahler Order допомогли створити модель басейну, визначити ієрархію річкової мережі та оцінити можливі ризики підтоплення. Було виявлено, що автоматизоване моделювання дозволяє більш точно визначати межі басейну, однак у складних рельєфних умовах можуть виникати похибки, зокрема, помилкове включення частини пригирлових територій річки Прут до басейну Брусниці. Ієрархічний аналіз річкової мережі показав, що більшість малих водотоків формуються у верхів'ях басейну, а основний стік зосереджується в середній та нижній течії. Аналіз зон підтоплення вказав на те, що найбільший ризик спостерігається в середній частині басейну, де концентрується стік після сильних опадів або танення снігу. Використання методу Sediment*

*Transport Capacity дозволило ідентифікувати зони ерозії, найбільш уразливі до руйнування ґрунту. Виявлено, що найактивніші ерозійні процеси відбуваються на схилах з великими ухилами, що може спричиняти зміну русла та накопичення осадів.*

*Застосування ГІС-технологій дозволило автоматизувати значну частину процесів, що зменшило похибки і зробило дослідження більш точним. Отримані результати мають практичне значення для управління водними ресурсами, зокрема для визначення ерозійно-небезпечних ділянок, оптимізації дренажних систем та планування протипаводкових заходів. Крім того, дані можуть бути використані для екологічного моніторингу, оцінки впливу антропогенних факторів на стан річкової екосистеми, а також для наукових досліджень, спрямованих на вивчення гідрологічних характеристик малих річок. Перспективними напрямками є інтеграція більш детальних цифрових моделей рельєфу з роздільною здатністю 5–10 метрів, використання реальних гідрометричних даних для калібрування моделей та аналіз змін клімату на стік у басейнах малих річок. Дослідження підтвердило, що використання ГІС є ефективним методом для аналізу річкових систем та управління водними ресурсами, що дозволяє враховувати просторово-часові особливості стоку, ідентифікувати потенційно небезпечні зони та розробляти рекомендації щодо сталого водокористування.*

**Ключові слова:** ГІС-моделювання, цифрова модель рельєфу (DEM), SAGA, QGIS, стале управління річковими системами.

**Вступ.** У сучасних умовах, коли глобальні кліматичні зміни та інтенсивна антропогенна діяльність впливають на водні ресурси, вивчення басейнових систем малих річок набуває особливого значення. Малі річки виконують важливі екологічні, економічні та соціальні функції, забезпечуючи водопостачання, підтримуючи біорізноманіття та формуючи локальні екосистеми. Проте вони також є надзвичайно вразливими до змін клімату, забруднення та нераціонального використання. Відсутність детального моніторингу і доступу до актуальних даних ускладнює ефективне управління такими водними системами.

Дослідження водозбірних басейнів і річкових мереж малих річок має критичне значення для запобігання паводкам, оптимізації водокористування та збереження екосистем. Наприклад, моделювання потоків і водозборів дозволяє ідентифікувати зони підтоплення, оптимізувати розташування гідротехнічних споруд і прогнозувати наслідки інтенсивних опадів або танення снігу. В умовах зростаючого впливу змін клімату такі дослідження допомагають виявляти слабкі місця в управлінні водними ресурсами та адаптувати їх до нових умов [10].

Для проведення такого роду досліджень необхідно залучати широкий спектр даних, зокрема:

- **Цифрові моделі рельєфу (Digital Elevation Models, DEM):** основа для аналізу напрямків потоків, меж водозборів і річкової мережі.
- **Гідрологічні та кліматичні дані:** для оцінки стоку, обсягів опадів і випаровування.
- **Топографічні карти:** для валідації цифрових моделей рельєфу.
- **Супутникові зображення:** для ідентифікації змін у річкових системах і землекористуванні.

Важливо зазначити, що сучасні геоінформаційні системи (ГІС) надають потужний інструментарій для аналізу та моделювання гідрологічних процесів. У межах даного дослідження було використано:

- **QGIS 3.22:** відкритий програмний продукт для обробки просторових даних, що дозволяє інтегрувати різні шари інформації, зокрема цифрові моделі рельєфу, шари водозборів і мереж каналів.

- **SAGA GIS 2.3.1:** система для автоматизованого геонаукового аналізу, яка надає розширені інструменти для моделювання стоку, визначення водозбірних площ і аналізу рельєфу.

Значна частина даних, необхідних для подібних досліджень, є у вільному доступі, що робить ці дослідження доступними для багатьох науковців та фахівців. Наприклад:

- **Copernicus Global Digital Elevation Model (DSM):** доступний через платформи, такі як OpenTopography [2].

- **USGS Earth Explorer:** надає доступ до супутникових зображень і DEM.

- **ESA Sentinel Hub:** дозволяє завантажувати зображення високої роздільної здатності для моніторингу землекористування.

Доступ до цих даних дозволяє значно скоротити витрати на дослідження, забезпечити широке територіальне охоплення і деталізацію аналізу. Використання відкритого програмного забезпечення та доступних даних забезпечує прозорість досліджень, їх відтворюваність та інтеграцію у ширші міжнародні наукові й екологічні проекти.

Актуальність проведення таких досліджень полягає у їх здатності вирішувати низку нагальних проблем. Зокрема:

1. Вивчення напрямків потоків і зон водонакопичення допомагає ідентифікувати ділянки, найбільш схильні до ерозії, що дозволяє розробляти природоохоронні заходи.

2. Точне визначення меж водозборів і їх гідрологічних характеристик сприяє ефективному плануванню та сталому використанню водних ресурсів для зрошення, промисловості та інших потреб.

ГІС-технологій дозволяють обробляти великі обсяги даних за короткий час, інтегрувати різномірну інформацію (цифрові моделі рельєфу, супутникові знімки, польові вимірювання), знижувати похибки та отримувати візуалізовані результати, які легко інтерпретувати. Варто зазначити, що використання інструмента Fill Sinks у QGIS та SAGA GIS забезпечує безперервність цифрової моделі поверхні, усуваючи помилки, які можуть спотворювати результати аналізу. Інструменти Strahler Order і Catchment Area дають змогу автоматизувати визначення ієрархії річкових мереж та меж водозборів із високою точністю.

**Метою даного дослідження** є напрацювання методики проведення моделювання водозборів і річкової мережі з використанням сучасних інструментів геоінформаційних систем (QGIS та SAGA GIS) на прикладі даних басейну річки Брусниця (права притока Пруту). Використання даної методики дозволяє провести детальний аналіз гідрологічної структури території, визначити напрямки потоків, ієрархію річкових каналів, меж водозборів і потенційні зони накопичення вологи, сприяючи точному плануванню управління водними ресурсами, екологічному моніторингу та попередженню паводкових ризиків.

Дослідження малих річок, таких як Брусниця, демонструють, як застосування сучасних технологій сприяє вирішенню екологічних і гідрологічних проблем. Автоматизоване моделювання водозборів і річкових мереж дозволяє ефективно аналізувати стан малих басейнів і розробляти рекомендації для їх захисту та сталого управління. Це особливо важливо для регіонів з підвищеним антропогенним навантаженням, де традиційні методи досліджень не забезпечують належного рівня деталізації та оперативності.

**Методи та матеріали дослідження.** Перш ніж проводити дослідження варто ввести визначення деяких понять які подібні за назвою але відмінні по своїй суті. Цифрова модель поверхні (ЦМП, DSM) та цифрова модель рельєфу (ЦМР, DTM) є основними типами цифрових моделей висот, які використовуються у гідрологічних дослідженнях, проте вони мають суттєві відмінності.

Цифрова модель поверхні (DSM) відображає висоту об'єктів, розташованих на поверхні землі, включаючи будівлі, дерева, інфраструктуру та інші природні й антропогенні об'єкти. Вона є корисною для задач, що потребують аналізу загальної поверхні території, наприклад, для моделювання міського середовища, оцінки лісових масивів або аналізу зон видимості.

Цифрова модель рельєфу (DTM) відображає виключно топографію земної поверхні, не враховуючи об'єкти, що розташовані над нею. DTM використовується для аналізу рельєфу, наприклад, у гідрологічних моделях, для оцінки стоку води, визначення напрямків потоків, меж водозборів та зон ерозії. DTM є базовим шаром для багатьох гідрологічних розрахунків, оскільки дозволяє працювати з природним рельєфом [9].

Щодо похибки, в методиці, яку ми використовуємо, застосовувалася цифрова модель поверхні Copernicus Global Digital Surface Model (DSM) з просторовою роздільною здатністю 30 метрів [2]. Висотна точність DSM становить приблизно  $\pm 4$  метри для рівнинних територій із низькою складністю рельєфу. Для гірських та передгірських районів, таких як басейн річки Брусниця, точність може бути нижчою через різкі перепади висот та складну топографію, де похибка може досягати  $\pm 10$  метрів у витоках річки. В нашій роботі ми використовуватимемо термін DEM, яких охоплює всі види висотних даних, але часто використовується як узагальнене поняття, що може включати як DSM, так і DTM. В нашому випадку ми ототожнюємо DSM та DEM (DSM = DEM).

Поставлені перед нами завдання, спираються на методи та методики, що довели свою ефективність [3-4]. Наприклад, в дослідженнях Buchanan et al. [1] основну увагу було зосереджено на застосуванні індексу зволоження рельєфу (Topographic Wetness Index, TWI) для аналізу сільськогосподарських ландшафтів. Автори підкреслили важливість використання інструменту Fill Sinks (Wang & Liu) (який будемо використовувати і ми) для усунення западин у цифрових моделях поверхні (DEM), що часто виникають через низьку роздільну здатність або топографічні особливості. Усунення таких помилок у DSM забезпечує безперервність моделювання стоку, що підвищує точність розрахунків водозборів, напрямків потоків і зон ризику ерозії. Застосування цього алгоритму дозволило отримати точні результати, які підтверджені співставленням із польовими даними. Зокрема, було показано, що коректне усунення западин має значний вплив на якість гідрологічних моделей для територій із активним сільськогосподарським використанням.

У роботі Olaya [8] алгоритм Fill Sinks (Wang & Liu) розглядається як один із найефективніших інструментів для роботи з цифровими моделями поверхні в програмному забезпеченні SAGA GIS. Алгоритм враховує масштаби западин та їхній вплив на водозбір, забезпечуючи коректність напрямків стоку. Автор наголошує, що цей інструмент є важливим для точного визначення меж водозборів, побудови річкових мереж і оцінки об'ємів стоку. Крім того, алгоритм демонструє високу швидкість обробки даних, що робить його зручним для роботи на великих територіях і підходящим для застосування в регіональних та глобальних дослідженнях. Робота Olaya акцентує увагу на тому, що використання Fill Sinks забезпечує зменшення похибок у гідрологічному аналізі та створює точну основу для подальших розрахунків.

У дослідженні Wolock і McCabe [14] розглядається порівняння однонапрямкових і багатонапрямкових алгоритмів розподілу потоків для розрахунку топографічних параметрів. Вони підтвердили, що інструмент Flow Accumulation є важливим для визначення зон накопичення води. Особливу увагу було приділено його застосуванню для прогнозування зон підтоплення в умовах інтенсивних опадів, а також для аналізу динаміки водних потоків. Автори показали, що цей інструмент дозволяє ідентифікувати найвразливіші ділянки в межах водозбірних басейнів і допомагає в управлінні водними ресурсами.

У праці Maidment і Djokic [3, 6] досліджується використання інструменту Flow Direction для моделювання напрямків потоку води. Автори продемонстрували, що цей підхід забезпечує високу точність навіть у складних умовах рельєфу. Вони акцентували увагу на можливості простежити основні шляхи руху води та побудувати мережу річкових каналів. Карти напрямків потоку, створені за допомогою цього інструменту, слугують основою для подальшого аналізу водозбірних систем і прогнозування ризиків підтоплення, що підтверджує його значущість для гідрологічних досліджень.

У роботі O'Callaghan і Mark [3, 7] запропоновано алгоритм для визначення меж водозбірних басейнів на основі цифрових моделей рельєфу. Автори показали, що інструмент Catchment Area дозволяє ефективно ідентифікувати водозбори, аналізувати їх гідрологічні характеристики та оцінювати обсяги води, що стікають до конкретних річкових систем. Важливість цього інструменту підтверджується його універсальністю, оскільки він забезпечує точність аналізу навіть на складних територіях зі значними змінами рельєфу. Алгоритм став базою для багатьох сучасних гідрологічних моделей і досліджень.

У дослідженнях Buchanan et al. [1, 3] ефективність інструмента Channel Network and Drainage Basins була підтверджена в аналізі структури річкових систем. Автори наголошували на важливості цього підходу для визначення основних каналів річкової мережі, зокрема для малих басейнів, де складна топографія може впливати на формування русел. Встановлено, що цей інструмент дозволяє з високою точністю ідентифікувати ключові потоки, їх ієрархію та зони злиття потоків, що особливо важливо для планування гідротехнічних споруд і запобігання паводкам.

Інструмент Overland Flow Distance to Channel Network використовується для оцінки часу руху води від поверхневих ділянок до основних потоків. У дослідженні Wolock і McCabe [3, 14] було доведено, що цей інструмент є критично важливим для прогнозування паводків, оскільки дозволяє визначити ділянки, які потребують додаткового захисту або моніторингу під час сильних опадів. Аналіз часу руху води допомагає виявити критичні зони, які можуть бути джерелами швидкого стоку і підвищеного ризику затоплення.

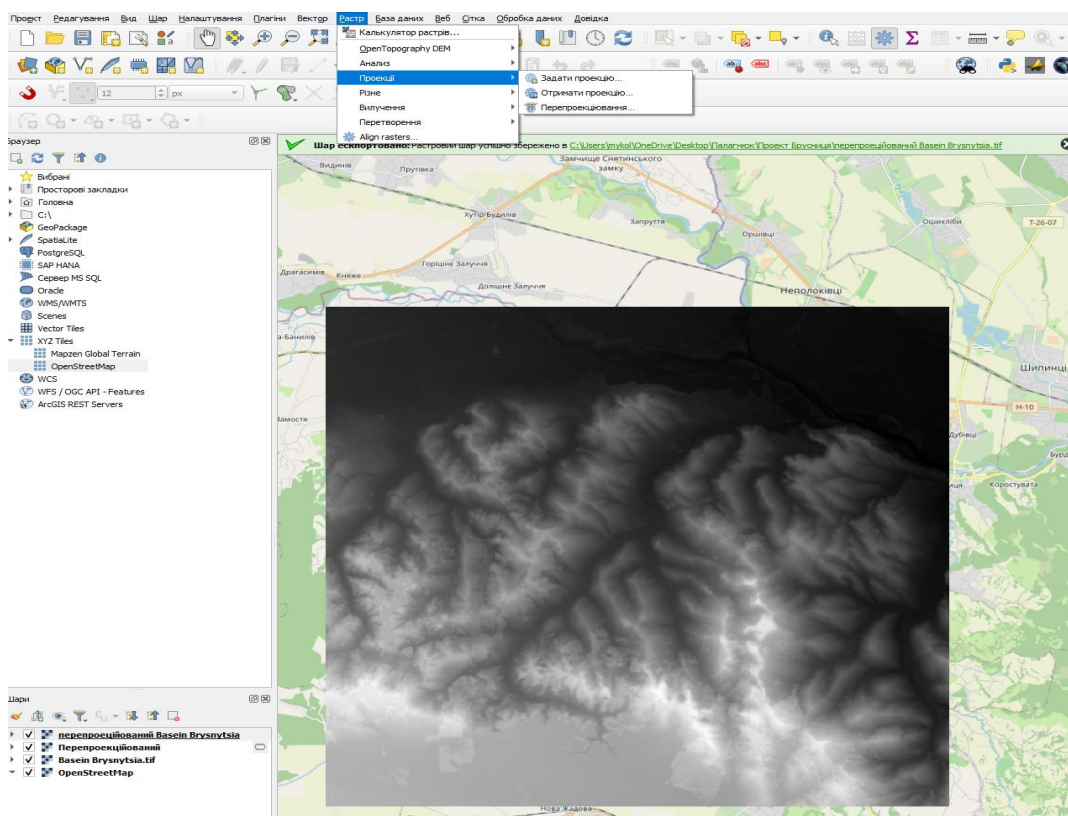
Застосування зазначених інструментів у рамках даного дослідження дозволило забезпечити комплексний підхід до аналізу річкової системи малої річки. Інструмент Channel Network and Drainage Basins виявився ключовим для ідентифікації структури річкової мережі,

Використання цих методів і підходів дозволило досягти високої точності моделювання та детального аналізу річкової системи, що є необхідним для вирішення сучасних завдань гідрології. У даному дослідженні ці інструменти були застосовані для аналізу басейну річки Брусниця, що дозволило отримати детальну картину просторово-часової організації водних потоків та визначити ключові гідрологічні характеристики досліджуваної території.

**Виклад основного матеріалу.** За допомогою цифрової моделі басейну річки Брусниця в Чернівецькому районі, ми проілюструємо можливості QGIS та SAGA GIS і розглянемо особливості моделювання цього басейну [3, 4].

DSM, що застосовуються в ГІС-програмах, створюються на основі точкових даних висот або аерофотознімків, отриманих методом дистанційного зондування. Зазвичай для формування цифрової моделі (DES – Digital Elevation Surface) завантажені дані потребують інтерполяції, проте в нашій роботі ми не розглядали цей варіант. Замість цього ми використовували вже інтерпольовану DSM для аналізу гідрологічних інструментів. Основою для створення даної DSM стали дані, завантажені через плагін QGIS «Open Topography DEM Downloader» (набір даних Copernicus Global DSM 30 м). Завдяки своїй доступності, достатній роздільній здатності та якості даних, цей набір є оптимальним вибором для гідрологічних досліджень басейнів малих річок.

Слід зазначити, що для встановлення цього плагіна потрібно зареєструватися на сайті <https://opentopography.org/blog/introducing-api-keys-access-opentopography-global-datasets> та отримати API-ключ для інтеграції в QGIS. Завантажена цифрова модель поверхні (рис.1), яку ми використовували в дослідженні, має роздільну здатність 30 метрів.



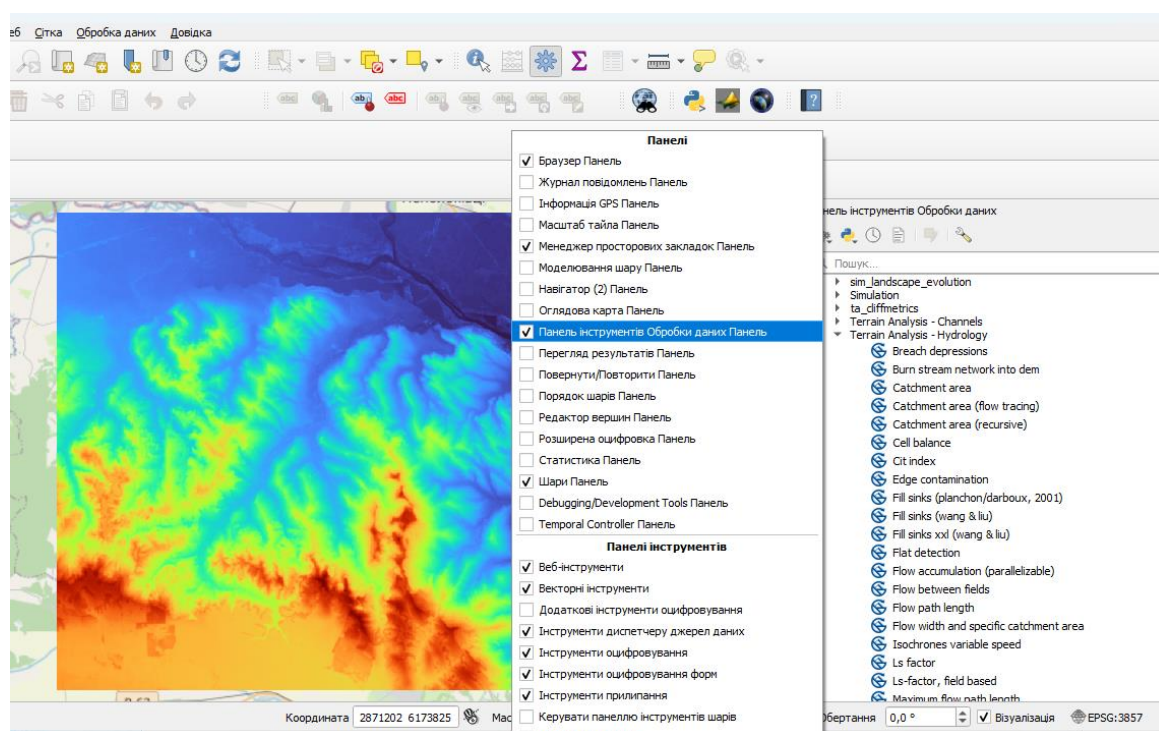
**Рис. 1. Модель поверхні Copernicus Global DSM для басейну річки Брусниця в QGIS 3.32**

У нашому дослідженні ми використовуємо систему координат EPSG:3857 (WGS 84 / Pseudo Mercator), яка є однією з найпоширеніших у веб-картографії. Її застосування в таких

онлайн-сервісах, як Google Maps, OpenStreetMap та Bing Maps, полегшує інтеграцію даних та поєднання різних картографічних шарів.

QGIS пропонує великий набір інструментів для гідрологічного аналізу. Ми обрали та встановили плагін SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) для апробації, оскільки цей потужний засіб геопросторового аналізу добре інтегрується в QGIS як інструмент для розширених обчислень і аналізу просторових даних. Завдяки своїм алгоритмам та засобам, SAGA дозволяє виконувати різноманітні геообчислення, зокрема у сферах гідрології, геоморфології, кліматичних і ландшафтних досліджень. SAGA була створена як самостійний ГІС продукт, проте частина функцій була інтегрована в QGIS, що дає можливість використовувати у поєднанні з іншими функціями даного продукту.

За допомогою встановленого плагіну ми використали низку інструментів SAGA 2.3.1 для моделювання поверхневих флювіальних процесів. Деякі з них мають схожі назви (рис.2), що на перший погляд може ускладнити вибір відповідного засобу для конкретних завдань. Оскільки ці інструменти входять до складу SAGA GIS, у них відсутня вбудована довідкова вкладка, яка пояснює їх призначення і методи використання, на відміну від основного програмного забезпечення. Тому ми створили короткий опис для кожного з них.



**Рис. 2. Відкриття SAGA та інструменту «Terrain Analysis /Аналіз рельєфу» - «Hydrology / Гідрологія» в QGIS 3.22. (модель рекласифікована для кращого візуального сприйняття)**

Ось перелік деяких гідрологічних інструментів SAGA та їх функціональність:

1. Fill Sinks (Wang & Liu) – інструмент для заповнення пробілів або неточностей у цифровій моделі рельєфу (DEM). «Пробіли», що виникають через похибки даних, можуть заважати нормальному стіканню води у модельованій цифровій моделі. Інструмент усуває ці «западини» та «пробіли», забезпечуючи рух води за природними напрямками, а метод Wang & Liu забезпечує безперервність та плавність модельованого потоку.
2. Flow Accumulation – інструмент який дозволяє розраховувати накопичення модельованого потоку, визначаючи кількість води, що збирається у кожній комірці цифрової моделі поверхні. Такий підхід дає можливість визначити місця концентрації потоків, які місця можуть стати майбутніми каналами стоку, і ідентифікувати потенційні русла та басейни.

3. Flow Direction – створює карту напрямків стоку води для кожної точки DEM, що допомагає визначити напрямок руху води з окремих комірок та побудувати гідрологічну мережу.
4. Catchment Area (Drainage Basins) – інструмент для визначення водозбірних басейнів, у яких вода збирається та стікає в основні потоки. Він окреслює межі кожного басейну, що важливо для аналізу річкових систем та їхніх допливів.
5. Channel Network and Drainage Basins – дозволяє створити мережу каналів і встановити межі водозбірних басейнів на основі DEM. Він є базовим інструментом під час моделювання напрямків стоку та визначенні структури річкових систем з урахуванням рельєфу місцевості..
6. Overland Flow Distance to Channel Network – дає змогу обчислити відстань від кожної клітинки цифрової моделі рельєфу до найближчого водного каналу, що дозволяє оцінити орієнтовний час, необхідний воді, аби досягти основного русла. Це має особливе значення для аналізу паводкової небезпеки та управління гідрологічними ризиками.
7. Water Surface (Flow Depth) – моделює глибину потоку води на поверхні залежно від накопичення, що може бути використане для моделювання розливів або оцінки ризиків затоплення.
8. Sediment Transport Capacity – розраховує здатність рельєфу транспортно переміщувати осади, що допомагає зрозуміти ерозійні процеси та скупчення осадів у річкових системах.

Ключовим етапом створення цифрової моделі басейну річки Брусниця є заповнення западин за допомогою інструменту Fill Sinks (Wang & Liu), як було описано раніше. Одним із важливих параметрів цього процесу є вибір параметру «Minimum Slope» (мінімальний ухил), що застосовується при формуванні DEM, і його значення обирають залежно від особливостей рельєфу басейну та мети дослідження. Для плоских та рівнинних територій, де ухили невеликі, рекомендується використовувати значення від 0.01 до 0.05, що дозволяє зберегти слабко нахилені ділянки як складову водозбірного процесу. Для територій з помірними ухилами, характерних для передгір'я, доцільним є вибір значень від 0.05 до 0.1, що допомагає уникнути надмірного вирівнювання дрібних западин, зберігаючи природний вигляд рельєфу. У гірських районах, де схили круті, оптимальними є значення від 0.1 до 0.3, оскільки вони дозволяють усунути глибокі западини, де можуть скупчуватися помилкові водні масиви, і зосередитися на основних потоках. Оскільки басейн річки Брусниця розташований у передгірському регіоні, для нього оптимальним вибором є значення 0.05–0.1, яке забезпечує баланс між усуненням дрібних западин та збереженням природного характеру рельєфу, а також зберігає основні особливості водозбору та потоку. Результатом цього процесу є заповнений Filled DEM (рис.3), який буде використаний на наступних етапах дослідження.

Наступним етапом стало створення моделі «Watershed Basins» для басейну річки Брусниця за допомогою інструменту Fill Sinks (Wang & Liu) на основі існуючого DEM (рис.4.). Цей засіб усуває западини рельєфу, які можуть спричинити помилкове накопичення води в ізольованих ділянках, формуючи безперервну поверхню для моделювання стоку. Для забезпечення надійності та перевірки точності автоматичної побудови басейну нами було створено полігональний шар басейну річки Брусниця (рис. 5).

Між автоматично сформованим шаром басейну річки Брусниця та тим, що окреслювався вручну (рис. 4 і рис. 5), можна простежити доволі виразну відмінність, яка пояснюється кількома ключовими чинниками. Перш за все, цифрова модель рельєфу (DEM), реалізована в середовищі QGIS, дає змогу одержати значно докладніші дані щодо висот і форми поверхні. Вона фіксує навіть незначні коливання рельєфу, котрі зазвичай можуть бути непоміченими або недостатньо відображеними на традиційних топографічних картах. Тож автоматизоване виділення водозбору дозволяє виявити додаткові ділянки, що належать до басейну, але залишаються поза увагою при ручному окресленні меж. У процесі підготовки ручного шару застосовувалися топографічні дані з ресурсу OpenTopoMap.org, які були завантажені через програму SAS Planet.

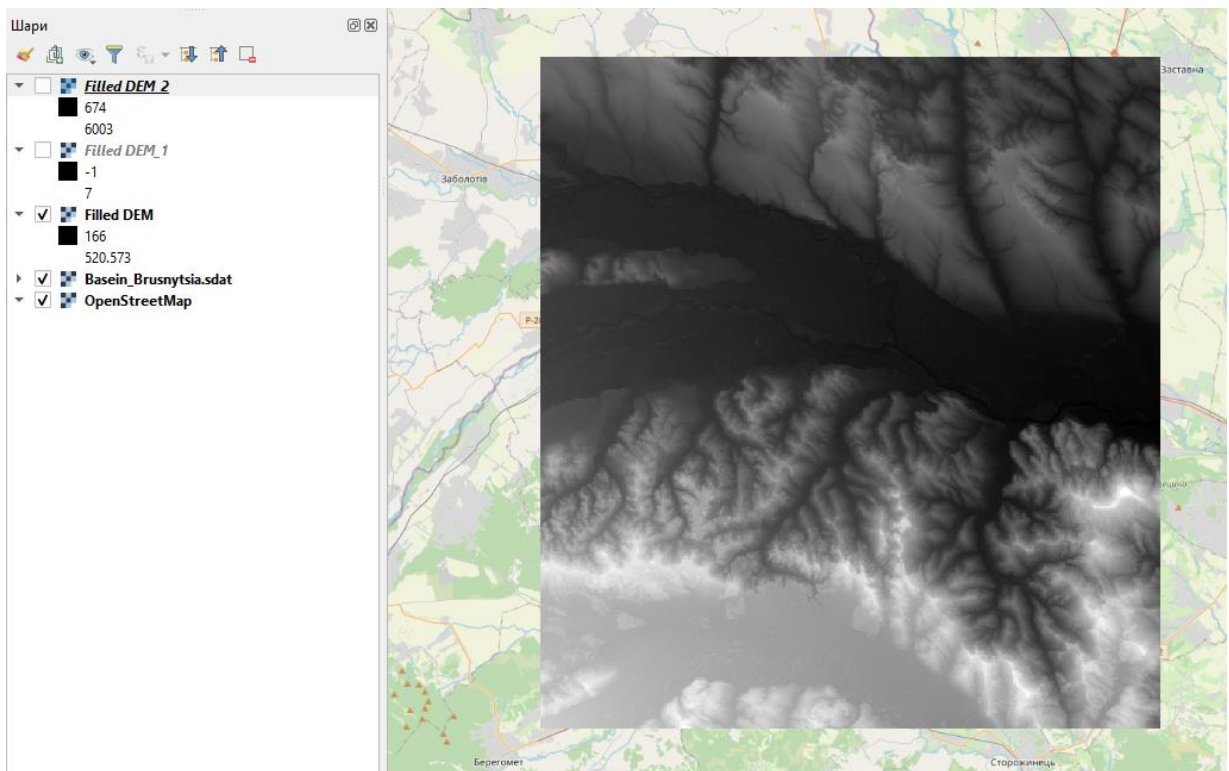


Рис. 3. Створена модель Filled DSM для басейну річки Брусниця

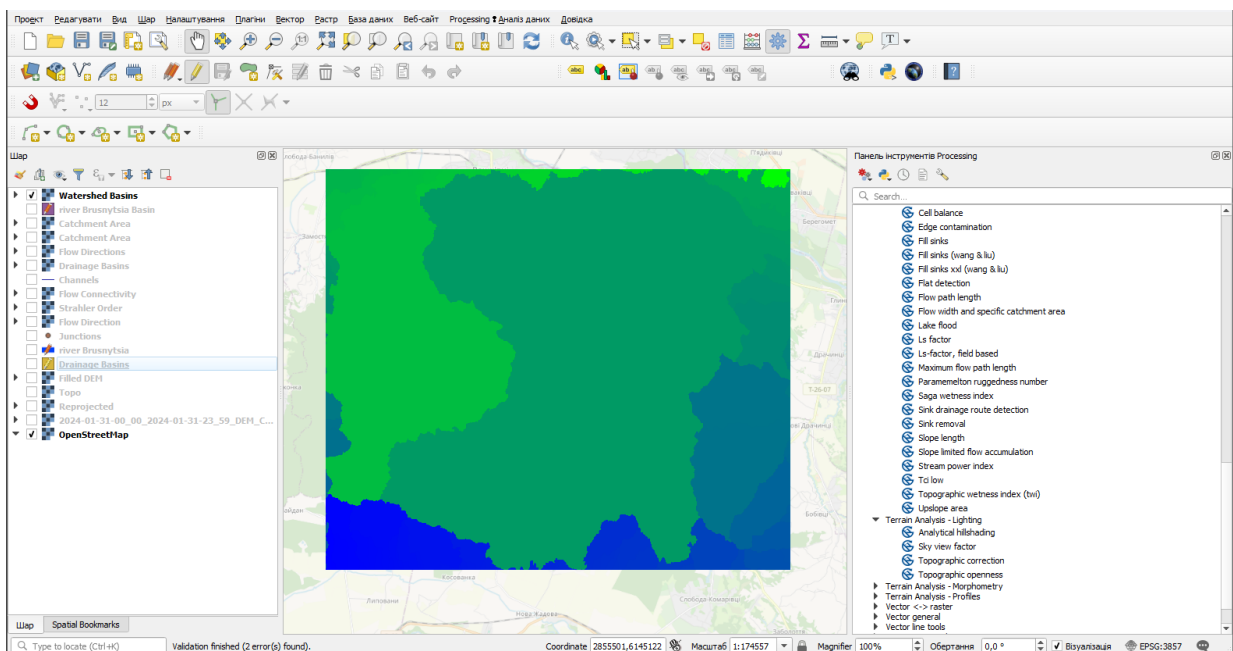
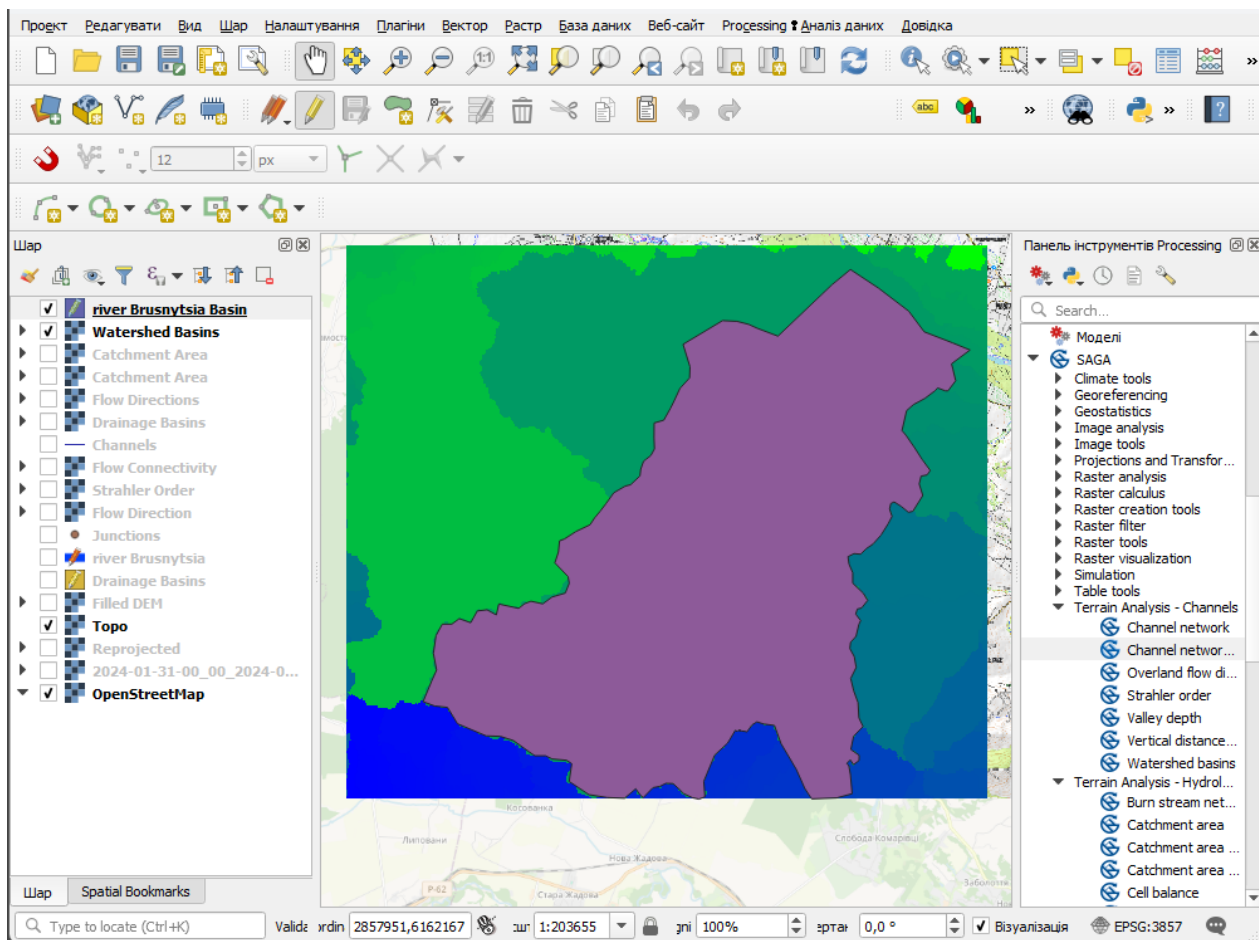


Рис. 4. Побудована модель «Watershed Basins» плагіном Fill Sinks (Wang & Liu) для басейну річки Брусниця

Однак топографічна карта не завжди включає дрібні водотоки або найдрібніші зниження, тоді як автоматизований інструмент Fill Sinks (Wang & Liu), що працює на базі цифрової моделі рельєфу, враховує всі можливі шляхи переміщення води й дає змогу уникнути суб'єктивних помилок. Таким чином, межі водозбору встановлюються переважно на основі фізико-географічних особливостей рельєфу, а не лише за візуальними ознаками чи окремими окресленими лініями.



**Рис. 5. Побудований вручну полігональний шар басейну річки Брусниця**

Щоправда, під час автоматичного визначення контуру водозбору річки Брусниця виникла певна неточність: до басейну було помилково включено частину прибережних ділянок річки Прут, стік з який неможливий в Брусницю. Ці території зосереджені в районі гирла і фактично не належать до водозбору Брусниці, оскільки з них стік безпосередньо потрапляє в Прут. Попри це, на ділянках витoku Брусниці та в зоні її середньої течії межі водозбору, визначені з допомогою цифрових методів, виявилися дуже точними і детальними. Такий підхід дає глибше розуміння структури басейну, адже враховує не лише обрис річкової системи, а й найменші елементи рельєфу, що впливають на розподіл поверхневого стоку. У результаті виходить комплексніша картина гідрологічних особливостей регіону, яку було б складніше отримати виключно за допомогою традиційних картографічних методів.

Отже, застосування DEM та автоматизованих інструментів у QGIS для моделювання водозбору дозволяє визначити межі басейну більш точно та детально. Проте через особливості алгоритму та специфіку рельєфу можуть траплятися помилки, коли до басейну включаються території, що фактично належать до іншої водозбірної системи. У цьому випадку автоматизована модель включила пригірлові ділянки, стік з яких спрямовується безпосередньо до Пруту, а не до Брусниці.

Наступним етапом було застосування інструменту «Catchment Area» з допомогою SGA GIS. Його застосування дає можливість отримати детальну інформацію про площу водозбору кожної клітинки в басейні річки Брусниця. Варто зазначити, що кожна точка на шарі відображає територію, з якої вода стікає до цієї конкретної клітинки. Це дозволило визначити суму територій, що забезпечують стік до кожної точки полігону. Завдяки цьому ми змогли проаналізувати напрямок та інтенсивність потоку води, виявивши зони з великою площею водозбору, які вказують на області з потенційно сильнішим потоком та можливим

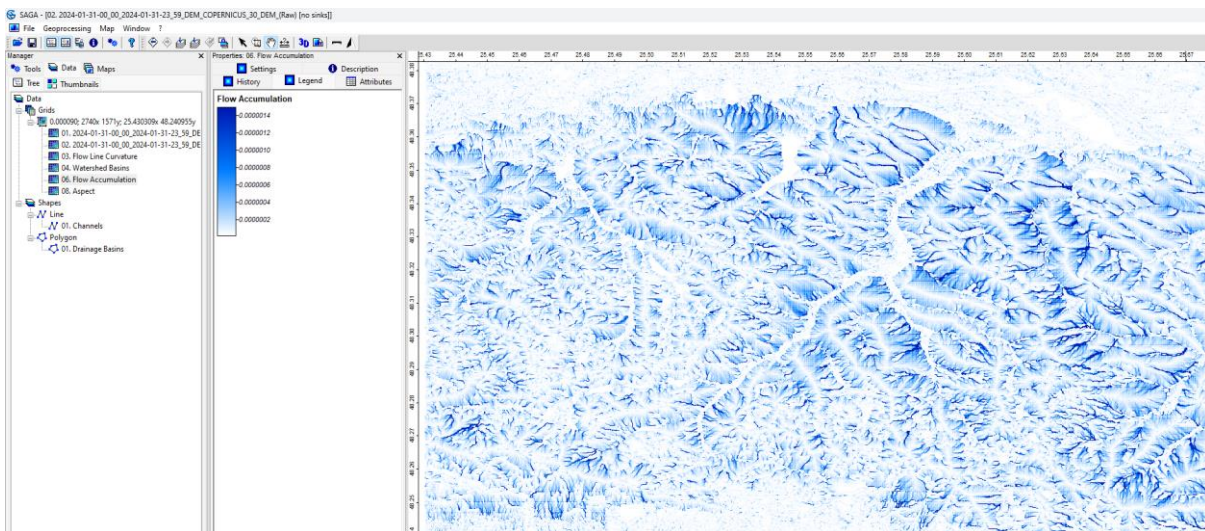
утворенням ерозійних лотків. Такі зони часто є місцями формування річок, струмків або інших водотоків. Крім того, шар дозволив класифікувати територію за гідрологічними характеристиками, ідентифікувавши верхів'я з мінімальною площею водозбору, схили, де відбувається накопичення води, та основні річкові русла з найбільшою площею водозбору.

При побудові моделі стоку для басейну річки Брусниця за допомогою інструменту «Catchment Area» важливо правильно визначити метод обчислення напрямку потоку, оскільки саме він впливає на те, як вода розподілятиметься по поверхні. Кожен з доступних методів має свої особливості і підходить для різних умов рельєфу, тому при визначенні площі водозбору необхідно уважно підійти до вибору оптимального алгоритму. Серед шести методів, які використовуються в цьому інструментарії, першим є детерміністичний 8 (D8) [9]. У цьому класичному підході потік води переміщується від центру кожної комірки до центру однієї з восьми сусідніх, що обмежує напрямок руху до кратних 45 градусів (O'Callaghan та ін., 1984) [6]. Другий метод, Rho 8, застосовує алгоритм, який випадковим чином призначає напрямок потоку до нижчих сусідніх комірок, враховуючи ступінь їхнього ухилу, де ваги кожної комірки розраховуються залежно від нахилу [5]. Третій метод, відомий як Модель рельєфу Брауншвейга (Braunschweiger Reliefmodell), дозволяє визначати множинні напрямки потоку, розподіляючи його до кількох суміжних комірок, але обмежує це розсіювання до трьох комірок, що допомагає контролювати загальне поширення потоку в DEM (Buchanan та ін., 2014) [1]. Четвертим методом є детерміністичний нескінченний (Deterministic Infinity), який забезпечує розподіл потоку від однієї комірки до двох сусідніх, враховуючи двовимірну схему стоку, що робить його рекомендованим для усунення обмежень моделі D8 [14]. П'ятий метод, множинний напрямок потоку (Multiple Flow Direction), припускає, що потік розподіляється в усіх напрямках вниз по схилу від заданої точки, що є особливо корисним для аналізу складних рельєфних структур [8]. Вибір оптимального методу значною мірою залежить від конкретних дослідницьких завдань та властивостей місцевості, тому перед застосуванням алгоритму рекомендується провести попередню оцінку DEM і умов стоку, щоб забезпечити найбільш точне моделювання водозбору.

Для рівнинних та слабко пересічених територій оптимальним є застосування методу детерміністичного напрямку (D8), оскільки він ефективно працює з простими, рівнинними ландшафтами, де потоки води чітко визначені. У гірських районах з різкими перепадами висот доцільно використовувати, як метод детерміністичної нескінченності (Deterministic Infinity), так і метод множинного напрямку потоку (MFD), які забезпечують більш точний розподіл водного стоку по складних схилах. Для передгірних територій або рельєфів із змінними нахилами корисними є модель рельєфу Брауншвейга або метод Rho 8, що дозволяють враховувати варіації нахилів та розсіювання потоку на помірних схилах. Нарешті, для пересічених територій зі складним рельєфом доцільним є застосування методу множинного напрямку потоку (MFD) або D8, оскільки ці методи дозволяють моделювати розтікання води в кілька напрямків одночасно [3].

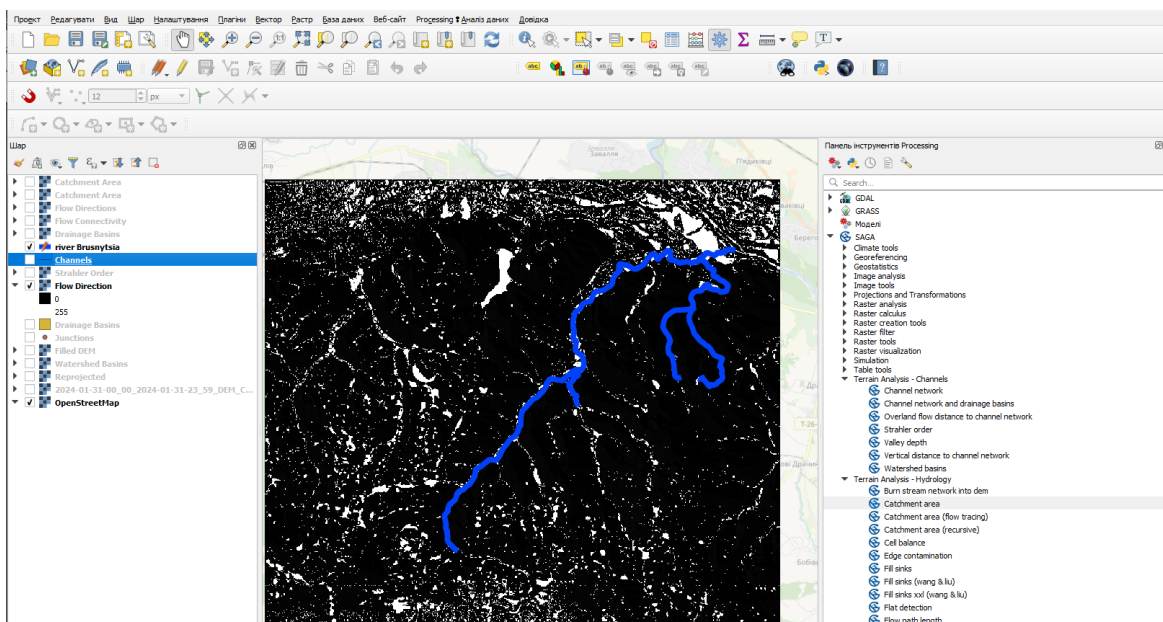
У нашому дослідженні для визначення напрямку потоку було обрано метод Multiple Flow Direction (MFD), оскільки річка Брусниця розташована в передгір'ї, де рельєф характеризується великою різноманітністю, а потоки води не завжди спрямовані в одному чіткому напрямку, що дозволяє MFD краще відобразити реалії даної місцевості. Додатково, шар Catchment Area, створений за допомогою відповідного інструмента в QGIS, демонструє площу водозбору для кожної клітинки цифрової моделі рельєфу (DEM), тобто показує, яка частина території постачає водний стік до кожної окремої точки, враховуючи вплив навколишніх ділянок. Це дає змогу не лише більш точно визначити межі басейну, але й краще зрозуміти розподіл водозбірних територій у досліджуваній області.

Модель, сформована за допомогою SAGA GIS (рис. 6), дає наочне уявлення про маршрути стоку води та ділянки можливого формування потоків. Вона відображає площу водозбору кожної клітинки і допомагає визначити зони водозбору, напрямки руху води, інтенсивність потоків, а також ділянки, схильні до ерозії або накопичення уламкових відкладів намитих порід.



**Рис. 6. Результат створення «Площі водозбору/ Catchment Area» для басейну річки Брусниця з допомогою SAGA GIS 2.3.1**

Такий підхід є вагомим інструментом при проведенні гідрологічного аналізу, прогнозуванні паводків, плануванні інфраструктури та раціональному використанні природних ресурсів. На основі інструменту «Channel Network and Drainage Basins» (Мережа каналів та дренажні басейни) у QGIS, нами було створено кілька ключових шарів на базі цифрової моделі рельєфу. Серед них виділяється шар Flow Direction (Напрямок потоку), що відображає вектор стоку води з кожної клітинки DEM. Як видно з рисунка 7, кожна клітинка отримує напрямок руху води відповідно до нахилу місцевості, що дає змогу прослідкувати загальний водний потік і розподіл води по поверхні. Даний шар слугує основою для подальшого аналізу стоку, визначення водозбірних басейнів та встановлення головних «напрямоків» руху води.

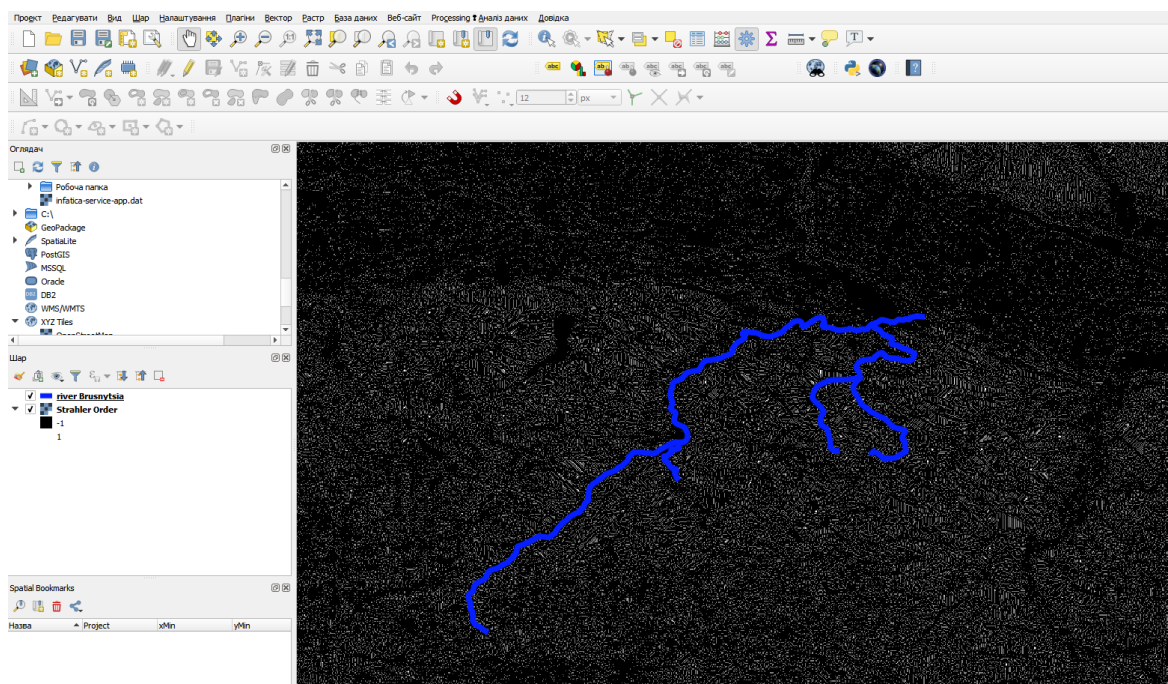


**Рис. 7. Шар «Flow Direction» створений для басейну річки Брусниця з наведеною гідрологічною мережею з допомогою QGIS 3.22**

Flow Direction також використовують у моделюванні ризиків затоплення та оцінці розподілу опадів, хоча в рамках нашого дослідження ця функція не застосовувалася.

- Strahler Order (Порядок Штралера) відображає гідрологічний порядок каналів, призначаючи їм значення на основі ієрархії річкової системи. Значення -1 позначає ділянки

поза річковою мережею (наприклад, ділянки цифрової моделі рельєфу (DEM), де вода не має можливості стікати або реальні географічні особливості (озера, карстові провалля)), тоді як 1 відповідає найменшим струмкам без приток (рис.8). Порядок зростає зі злиттям річок, дозволяючи ідентифікувати основні водні потоки та їх ієрархічну структуру для аналізу мережі, прогнозування швидкості потоку та визначення зон концентрації води.

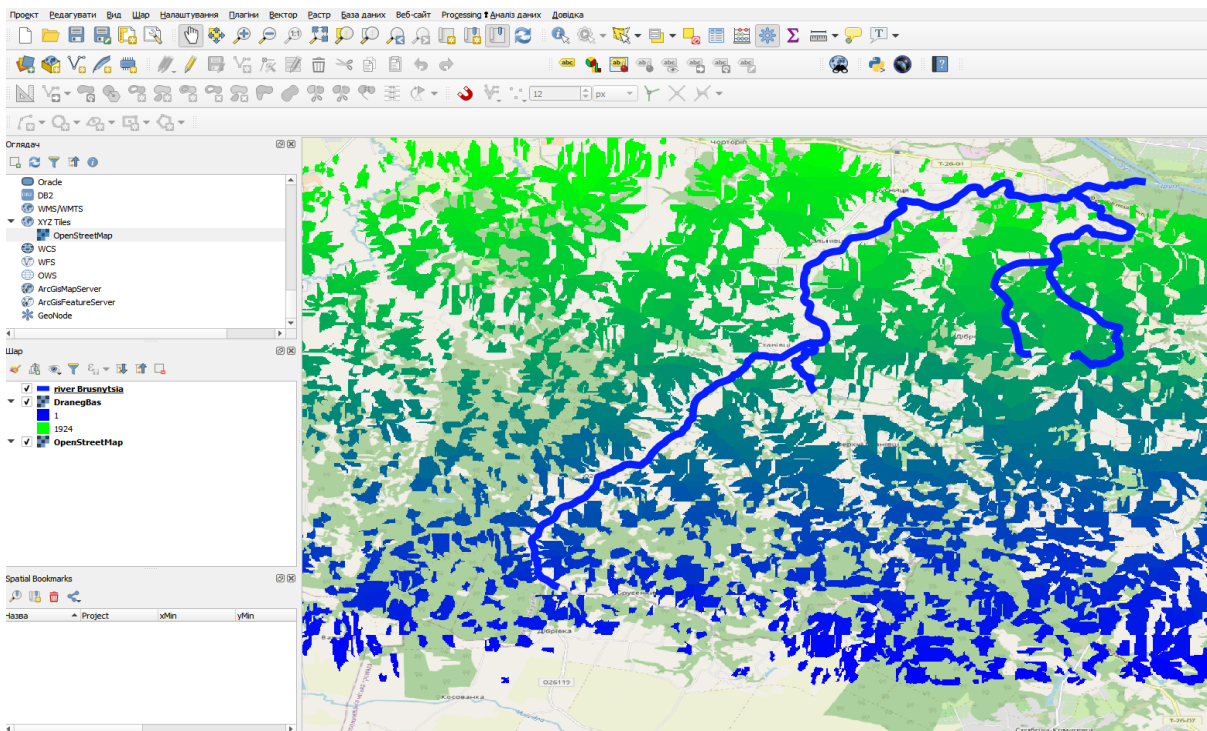


**Рис. 8. Шар «Strahler Order» створений для басейну річки Брусниця з наведеною гідрологічною мережею з допомогою QGIS 3.22**

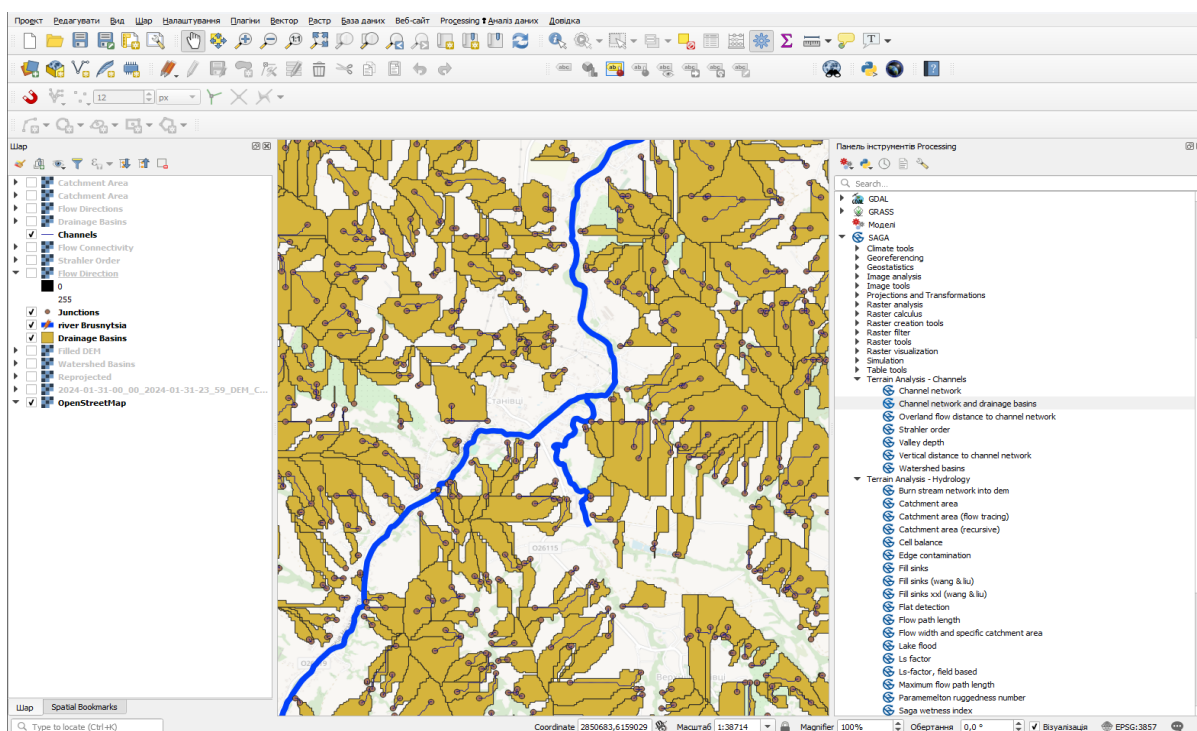
- Drainage Basins (Водозбірні басейни) показує межі суббасейнів, тобто області, з яких вода стікає в одну точку або річкову систему. Кожен басейн включає території, що живлять конкретний водний потік. З цього шару можна визначити межі водозборів та площу, з якої відбувається стік води до конкретного каналу або річкової системи. Він є важливим для управління водними ресурсами, планування дренажних систем та екологічного аналізу, оскільки дозволяє зрозуміти, які території впливають на обрану річку чи струмок. Значення від 1 до 1924 для річки Брусниця відповідають ідентифікаторам суббасейнів, де вищий номер вказує на більшу площу водозбору та об'єднання підбасейнів (рис. 9). Для аналізу окремих ділянок використовуйте фільтрацію за ID або градієнт кольорів. Шар критично важливий для управління водними ресурсами та екологічного аналізу, оскільки показує вплив структури та забудови території на формування річки. Також є можливість представити суббасейни у вигляді замкнених полігонів з вузлами злиття (рис. 10).

Шар Channels (Канали) відображає лінійні структури річкових русел чи водних потоків, що проходять через визначену територію (рис.10). Він ілюструє розташування головних водотоків і дає змогу визначити основні напрями стоку води. Така інформація є надзвичайно корисною для вивчення річкових систем, аналізу водного стоку та планування дренажу, адже канали вказують, де саме вода накопичується та куди спрямовується під час опадів або танення снігу.

Шар Junctions (Вузли), у свою чергу, відображає точки злиття або розгалуження потоків у річковій мережі (рис.10), де поєднуються два або більше водних потоки. Ці вузлові точки є ключовими елементами річкового басейну, оскільки саме в них відбувається найбільше накопичення води та може змінюватися напрямок потоку. Використання шару Junctions сприяє моделюванню гідрологічних процесів, оцінці обсягів води, що утворюється в річковій системі, та допомагає прогнозувати ймовірні зони паводків.



**Рис. 9.** Шар «Drainage Basins» створений для басейну річки Брусниця з наведеною гідрологічною мережею з допомогою QGIS 3.22



**Рис. 10.** Шари «Drainage Basins», «Channels» та «Junctions» з допомогою QGIS 3.22

**Висновки.** Дослідження басейну річки Брусниця продемонструвало ефективність інтеграції сучасних ГІС-інструментів та цифрових моделей рельєфу для комплексного аналізу гідрологічних та геоморфологічних характеристик. Використання програмного забезпечення QGIS 3.22 і SAGA GIS 2.3.1 разом із даними Copernicus Global DSM дозволило створити деталізовану багатозарову модель, яка охопила водозбірні басейни, річкову

мережу з її ієрархією, напрямки стоку та зони накопичення води. Ключову роль відіграла попередня обробка цифрової моделі рельєфу за допомогою інструменту Fill Sinks (Wang & Liu), що усунуло артефакти та забезпечило високу точність розрахунків.

Автоматизоване моделювання виявило структурні особливості річкової системи, такі як ієрархія потоків за Strahler Order, зони підвищеного стоку та потенційні ділянки ризику затоплень та ерозій. Проте в процесі аналізу виникли незначні неточності, зокрема включення пригирлових зон річки Прут до меж басейну Брусниці, що вказує на необхідність калібрування алгоритмів для складних рельєфів.

Результати дослідження мають важливе практичне значення для управління водними ресурсами, зокрема визначення ерозійно-небезпечних ділянок, оптимізації дренажних систем та планування протипаводкових заходів. Вони також можуть слугувати основою для екологічного моніторингу, дозволяючи оцінювати вплив антропогенних факторів на стан річкової екосистеми. Запропонована методика демонструє універсальність для застосування на інших малих річках, особливо в умовах зростання кліматичних ризиків.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення моделей шляхом інтеграції реальних гідрометричних даних, використання високоточних DEM та розширення аналізу на сусідні водозбірні території. Ця робота підкреслює, що ГІС-технології є незамінним інструментом для науково обґрунтованого та сталого управління річковими системами в умовах сучасних викликів.

#### Список літератури / Reference

1. Buchanan B. P., Fleming M., Schneider R. I., Richards B. K., Archibald J., Qui Z., Walter M. T. Evaluating topographic wetness indices across central New York agricultural landscapes // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2014. Vol. 18. P. 3279–3299. DOI: 10.5194/hessd-10-14041-2013.
2. Copernicus Land Monitoring Service. Products including DEM URL: <https://land.copernicus.eu/>
3. Exploring Hydrological Analyses using SAGA GIS URL: [https://dges.carleton.ca/CUOSGwiki/index.php/Exploring\\_Hydrological\\_Analyses\\_using\\_SAGA\\_GIS](https://dges.carleton.ca/CUOSGwiki/index.php/Exploring_Hydrological_Analyses_using_SAGA_GIS).
4. Exploring the Hydrological Tools in QGIS URL: <https://dges.carleton.ca/CUOSGwiki/index.php/Exploring%20the%20Hydrological%20Tools%20in%20QGIS>.
5. Fairfield J. F., Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/90WR02658>.
6. Maidment D., Djokic D. Hydrologic and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information Systems. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute Inc.; 2000. 216 p. URL: <https://scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1521824>.
7. O'Callaghan J. F., Mark D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1984. Vol. 28, № 3. P. 323–344. DOI: 10.1016/S0734-189X(84)80011-0.
8. Olaya V. A gentle introduction to SAGA GIS. Edition 1.1, revised December 9, 2004. Revised by Javier Pineda and Victor Olaya URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3173871>.
9. Seibert J., McGlynn B. L. A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water Resources Research*. 2007. Vol. 43, № 4. DOI: 10.1029/2006WR005128.
10. Shamsi U. M. GIS Applications for Water, Wastewater, and Stormwater Systems. Boca Raton, FL: CRC Press Inc. 2005. 398. URL: <https://uodiyala.edu.iq/uploads/PDF%20ELIBRARY%20UODIYALA/EL32/GIS%20Applications%20for%20Water,%20Wastewater.pdf>.
11. Tarboton D.G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*. 1997. Vol. 33, № 2. P. 309–319. DOI: 10.1029/97WR00304.
12. Wagener T., Sivapalan M., Troch P., Woods R. Catchment classification and hydrologic similarity. *Geography Compass*. 2007. Vol. 1, № 4. P. 901–931. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Catchment-Classification-and-Hydrologic-Similarity-Wagener-Sivapalan/cf53d46fd25b1e98486f76572d67f8f59919053d>.

13. Wainwright J., Mulligan M. Environmental Modeling: Finding Simplicity in Complexity. West Sussex, UK: John Wiley & Sons, Ltd. 2013. 496. URL: [https://books.google.com/books/about/Environmental\\_Modelling.html?id=gff0sx0els8C](https://books.google.com/books/about/Environmental_Modelling.html?id=gff0sx0els8C).

14. Wolock D.M., McCabe G.J. Comparison of single and multiple flow direction algorithms for computing topographic parameters in TOPMODEL. Water Resources Research. 1995. Vol. 31, № 5. P. 1315–1324. DOI: 10.1029/95WR00471.

### **GIS modeling of the watershed and river network: analysis of hydrological processes on the example of the Brusnytsia river basin**

**Pasichnyk M.D.**

*The study of the Brusnytsia River basin demonstrates the effectiveness of modern GIS technologies for analyzing watershed systems, which is particularly relevant in the context of climate change and intensive anthropogenic impact. Small rivers play a crucial role in maintaining ecological balance, providing water supply, supporting biodiversity, and shaping local ecosystems. However, they are highly vulnerable to climate change, pollution, and irrational use, necessitating detailed monitoring and the development of effective management strategies. The main objective of this study was to model the watershed and river network of the Brusnytsia River using digital elevation models and GIS tools. The use of QGIS 3.22 and SAGA GIS 2.3.1 enabled precise spatial characterization, determination of flow directions, watershed boundaries, and the hierarchy of the river network, which improves the accuracy of flood forecasting, erosion assessment, and the development of water resource conservation measures.*

*The study utilized digital elevation models, particularly the Copernicus Global Digital Elevation Model with a 30-meter resolution, topographic maps, satellite images, and hydrological data. Algorithms such as Fill Sinks (Wang & Liu), Flow Direction, Flow Accumulation, Catchment Area, Drainage Basins, and Strahler Order helped to create a basin model, determine the river network hierarchy, and assess potential flood risks. It was found that automated modeling allows for more accurate watershed boundary delineation; however, in complex terrain conditions, errors may arise, including the erroneous inclusion of part of the Prut River's floodplain into the Brusnytsia basin. The hierarchical analysis of the river network revealed that most small watercourses form in the upper reaches of the basin, with the main runoff concentrated in the middle and lower sections. Flood zone analysis indicated the highest risk in the middle part of the basin, where runoff accumulates following heavy rainfall or snowmelt. The use of the Sediment Transport Capacity method allowed for the identification of erosion-prone zones most susceptible to soil degradation. The study found that the most active erosion processes occur on steep slopes, which may lead to channel shifts and sediment accumulation.*

*The application of GIS technologies enabled the automation of significant parts of the process, reducing errors and making the study more precise. The results have practical implications for water resource management, particularly in identifying erosion-prone areas, optimizing drainage systems, and planning flood prevention measures. Additionally, the data can be used for environmental monitoring, assessing anthropogenic impacts on river ecosystems, and conducting scientific research on the hydrological characteristics of small rivers. Promising directions include integrating more detailed digital elevation models with resolutions of 5–10 meters, using real hydrometric data for model calibration, and analyzing climate change impacts on runoff in small river basins. The study confirmed that GIS is an effective method for analyzing river systems and managing water resources, allowing for the consideration of spatiotemporal runoff features, identification of potentially hazardous areas, and development of recommendations for sustainable water use.*

**Keywords:** GIS modeling, Digital Elevation Model (DEM), SAGA, QGIS, sustainable management of river systems.

**Надійшла до редколегії 26.12.2024**

**DOI:** <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.4.4>

УДК 556.5

**Гопцій М.В.<sup>1</sup>, Поздняков Ю.О.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ

<sup>2</sup>Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса

## **ОЦІНКА СЕЗОННОГО СТОКУ РІЧОК СУББАСЕЙНУ ТИСИ**

*Стаття присвячена дослідженню водного режиму річок суббасейну Тиси в межах України, що є критично важливим в умовах сучасних кліматичних змін, які характеризуються зростанням екстремальних погодних явищ. Метою дослідження є оцінка величини річного стоку, аналіз фаз водності та коливань водності в межах сезонів, що дозволяє визначити періоди з надлишком або дефіцитом водних ресурсів.*

*Використовуючи статистичні методи обробки стокових рядів спостереження визначені середні багаторічні модулі стоку та їх просторово-часову мінливість.*

ISSN:2306-5680 **Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology. 2024. № 4 (74)**