



М. Т. Микуцей, Я. О. Адаменко

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

НАПІВАВТОМАТИЧНЕ РОЗМЕЖУВАННЯ НИЗЬКОПОРЯДКОВИХ ВОДОЗБОРІВ ЯК ОБ'ЄКТІВ ВІДНОВЛЕННЯ ПРИРОДИ В УМОВАХ АНТРОПОГЕННИХ ЗМІН

Налаштовано і випробувано метод напівавтоматичного розмежування водозборів водотоків найнижчих ієрархічних рівнів в інтервалі площ 10-80 км², що перебувають під антропогенним впливом, впливом сільського господарства, інженерних гідрогеоморфологічних змін. Здійснено вдалу спробу інтеграції природних та штучних потоків і каналів (природних, меліоративні канали, спрямлені відводи русел) з постійним та ефемерним режимами стоку в підготовлену цифрову модель висоти DEM (англ. *Digital Elevation Model*) роздільної здатності 30 м із застосуванням інструменту QSWAT+ (англ. *QGIS Soil and Water Assessment Tool Plus*), що є удосконаленою версією SWAT (інструменту для оцінювання ґрунту та води). Для цього використовували еталонні векторні шари потокової мережі, створені на підставі знімків високого масштабування із застосуванням програмного забезпечення для перегляду, аналізу та оброблення супутникових знімків і геопросторових даних Google Планета Земля Про (англ. *Google Earth Pro*), та за результатами польової перевірки найбільш віддалених елементів, їхнього зв'язку з основним руслом. Процедуру розмежування з активацією інструменту "Burn in existing stream network" апробовано для двох окремих цільових низькопорядкових водозборів водотоків приміської та міської зон Івано-Франківського району: Млинівки Стебницької (права притока р. Бистриці Солотвинської) та Черешеньки (ліва притока Бистриці Солотвинської), що перебувають в умовах антропогенних змін зарегулювання стоку, а також для водозбору річки Бересток, правої притоки Дністра в межах Коломийського району, що формує стік в умовах сільського агроландшафту на схилі землях. Загалом встановлено, що виконання комплексного оброблення та підготовки DEM з використанням вбудованих фільтрів та функцій згладжування, заповнення порожнин DEM (30 м) у Q-GIS та SAGA-GIS, а також повторної В-сплайн інтерполяції на вилучених складних чи спотворених ділянках дає змогу достатньо швидко налаштувати та інтегрувати мережі природних і штучних потоків і каналів у підготовлену DEM середньої роздільної здатності з використанням вбудованих функцій інструменту QSWAT+. Це дає змогу швидко провести окреслення меж водозбору з високою надійністю, незважаючи на наявні антропогенні гідрогеоморфологічні зміни території, та можливість штучного перерозподілу стоку. Випробування алгоритму дало змогу розвинути концепцію цільового розмежування низькопорядкових водозборів, як цілісних об'єктів відновлення природи, що може стати важливим практичним інструментом для реалізації політики відновлення екосистем на рівні територіальних громад в Україні, зважаючи на Регламент ЄС "Про відновлення природи". Формування мережі ділянок і територій для відновлення екосистем, застосовуючи водозбірний принцип з акцентом на малих водотоках та їхніх водозборах, може стати комплексним практичним підходом, який буде орієнтований на вибір найбільш уразливих, чутливих екосистем. Зокрема, відновлення екосистем низькопорядкових водозборів до природного стану покликане спровокувати та запустити природні сукцесійні механізми, експоненційне відновлення, стабілізацію та підтримання високосприятливого хімічного та біологічного стану компонентів довкілля, оптимізації кліматичних умов, гідрологічного балансу, повернення та посилення екосистемних зв'язків у регіональних і національних масштабах.

Ключові слова: розмежування водозбору; цифрова модель рельєфу; польове збирання даних; канали дренажної мережі; природні та штучні потоки.

Вступ / Introduction

Водозбори є основними гідрологічними одиницями, які змінюються за розмірами, починаючи від мікродозборів (менше 10 га) до суббасейнів (більше 1000 га) [3], та характеристиками, і є важливими для гідрологічного аналізу, управління водними ресурсами та екологічними ризиками землекористування. Розмежування

вододілів та гідрогеоморфологічних об'єктів є фундаментальним кроком для геопросторових досліджень та аналізу природних та антропогенних процесів у довкіллі [4]. Однак відтворення потокової мережі та розмежування водозбору, що може здійснюватись кількома методами, враховуючи традиційне ручне окреслення за топографічними картами та сучасні методи на підставі геоінформаційних систем (ГІС) із використанням циф-

Інформація про авторів:

Микуцей Михайло Тарасович, аспірант, кафедра екології. Email: mmtcoif@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2613-7729>

Адаменко Ярослав Олегович, д-р техн. наук, професор, кафедра екології. Email: yaroslav.adamenko@nung.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-5665-7958>

Цитування за ДСТУ: Микуцей М. Т., Адаменко Я. О. Напівавтоматичне розмежування низькопорядкових водозборів як об'єктів відновлення природи в умовах антропогенних змін. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 2. С. 88–100.

Citation APA: Mykytsei, M. T., & Adamenko, Ya. O. (2025). Semi-automatic delineation of low-order catchments as nature restoration objects under anthropogenic changes. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(2), 88–100. <https://doi.org/10.36930/40350210>

рових моделей висот, залишається складним завданням, якщо йдеться про точне моделювання процесів у дрібному масштабі, наприклад моделювання стоку та забруднення водотоків найнижчих ієрархічних рівнів, які в процесі господарського розвитку були змінені, спрямлені та інтегровані з дренажними, осушувальними та стічними мережами каналів [5].

Хоча ручні методи розмежування водозбірної площі у складних умовах можуть бути точними, вони часто є трудомісткими та дорогими [3]. ГІС-технології, зокрема з використанням DEM та контурної інформації, стали потужним інструментом, пропонуючи більшу ефективність і точність. Методи автоматичного розмежування, що базуються на DEM, а також інтеграцію польових даних для калібрування моделей, активно обговорюють, при цьому основну увагу зосереджено на покращенні точності гідрологічних прогнозів та оцінювання стоку. Однак більшість наявних досліджень зосереджені на розмежуванні середніх і більших урбанізованих водозборів, тоді як низькопорядкові водозбори у сільських і приміських зонах, які найчастіше зазнають інтенсивних антропогенних змін, залишаються менш охоплені дослідженнями, зокрема в Україні.

Визначення місця розташування і довжини водотоку в процесі розмежування водозбору є ключовими параметрами для створення точної потокової мережі. Довжина автоматично змодельованих водотоків залежить від обраного порогу, що може зумовити деякі похибки в кінцевих результатах. Тому, щоб відокремити ці види помилок від помилок повторної вибірки, орієнтиром є дані про точне розташування потоків і каналів, які можуть бути отримані з DEM вищої роздільної здатності (наприклад LIDAR (англ. *Light Detection and Ranging*), або способом оцифрування топографічних карт чи супутникових знімків вищої точності [18]. Часто дані високої роздільної здатності відсутні для більшості територій, або перебувають в обмеженому доступі. Відсутність детальних цифрових картографічних даних про межі водозборів малих річок і струмків на місцевому та державному рівнях значно ускладнює їх ідентифікацію, зокрема як цілісних об'єктів для екологічного відновлення. Це створює проблему для оцінювання впливу сільськогосподарської та іншої господарської діяльності на водні екосистеми, а також для планування заходів з відновлення природи відповідно до європейських екологічних норм.

Загалом використання даних польової перевірки (верифікації in-situ), наприклад для врахування антропогенно змінених крайових елементів потокової мережі та виходів, врахування даних штучного перерозподілу стоку в складних умовах, у поєднанні з функціями автоматичного відмежування водозбірної площі з використанням ГІС та наявних DEM (30 м), становлять особливу зацікавленість на тлі кліматичних аномалій, стрімких опадів, потреби підвищення точності моделювання стоку для оцінювання супутних ризиків, наприклад ризиків дифузійного хімічного забруднення і ймовірних наслідків для екосистем на рівні громад.

Отже, концепційною основою цього дослідження є розвиток адаптивних підходів у підготовці вихідних даних для моделювання екологічних процесів на рівні малих водозборів в інженерно змінених (порушених) сільським господарством та урбанізацією умовах, способом інтеграції польових даних та ГІС-методів для підвищен-

ня точності, а також у розвитку інструментів для втілення концепції цільового розмежування низькопорядкових водозборів, як цілісних об'єктів відновлення природи.

Об'єкт дослідження – розмежування низькопорядкових водозборів водотоків найнижчого ієрархічного рівня.

Предмет дослідження – методи та засоби напівавтоматичного розмежування водозборів малих водотоків як об'єктів відновлення природи в умовах антропогенних змін, що дасть змогу здійснити інтеграцією антропогенно зміненої потокової мережі, а також врахувати дані польової перевірки.

Мета роботи – випробувати процедуру напівавтоматичного розмежування малих водозборів приміських і сільських територій програмними інструментами ГІС з акцентом на верифікацію in-situ, що дасть змогу оцінити придатність запропонованої методики для окреслення низькопорядкових водозборів як цілісних об'єктів і планувальних одиниць для відновлення природи.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- зібрати та опрацювати дані польових досліджень про зміни в потоковій мережі в межах цільових водозборів, що дасть змогу інтегрувати ці зміни в цифрову модель висоти та підвищити точність авторозмежування;
- підготувати цифрову модель висоти середньої роздільної здатності DEM (30 м) та створити векторні шари потоків і каналів на підставі супутникових знімків території, використовуючи програмні інструменти Google Earth Pro та залучаючи дані польових досліджень, що дасть змогу випробувати вбудовані функції інструменту QSWAT+ для цільових низькопорядкових водозборів;
- адаптувати параметри запуску процесу інтеграції потокової мережі та автоматичного розмежування з перевіркою ефективності відтворення, що дасть змогу оцінити придатність запропонованої методики для окреслення низькопорядкових водозборів як об'єктів та планувальних одиниць для політики відновлення природи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вибір і пріоритизація вододілів є критичними етапами управління водозборами, а потреба в цій діяльності виникає на тлі відсутності достатніх коштів для одночасного повномасштабного відновлення вододілів. У роботі [19] проаналізовано параметри вибору (пріоритизації) водозбору в контексті географічних зв'язків "село-вододіл". Автор наголошує на потребі залучення геопросторових технологій та участі людей. Зазначено, що ефективне використання сучасних геопросторових технологій із залученням місцевих громад є одним з найкращих способів для пріоритизації та вибору водозборів, де першим кроком є карта чітко окресленого вододілу або групи вододілів у межах окремих територіальних одиниць.

Окрім цього, за даними дослідження [17], результати візуалізації напрямків потоку та меж водозборів, разом із просторовим аналізом і валідацією підтверджували ефективність і надійність інструментарію на підставі ГІС для високоточного окреслення водозборів, зокрема у міських умовах, що вирізняється особливою складністю, а наприклад, інтеграція топографічної інформації та даних про дощову каналізацію виявилася цінним підходом для моделювання складних процесів поверхневого стоку в неоднорідних урбанізованих районах. Це дає змогу сформулювати основу для покращеного процесу управління міськими дощовими водами і прийняття відповідних рішень.

Незважаючи на значний прогрес у галузі гідрології та геоінформаційних технологій, розмежування низько-

порядкових водозборів залишається складним завданням через високу детальність даних, які потрібні для точного визначення меж таких водозборів, а також через вплив антропогенних факторів, які модифікують природні водні мережі. У світі активно розробляють та впроваджують нові методи та алгоритми для покращення точності та ефективності цієї процедури, однак повна автоматизація та інтеграція різних джерел даних залишаються актуальними викликами. Зокрема, у роботі [4] наведено огляд та висновки щодо ефективності наявних геопросторових інструментів для окреслення вододілів, річкових мереж, підвододілів, а також для обчислення просторової морфометрії, серед яких: TorotoIb, що окреслює річкові мережі, вододіли та підвододіли, LSDtopotools на базі Linux, що передусім зосереджений на видобутку каналів та атрибутів, охоплює компоненти GeoNet та атрибує мережу для топографічних даних з високою роздільною здатністю (тобто Lidar), інструмент RivGraph, що автоматизує вилучення річкових мереж та атрибутів з бінарних зображень річкових мереж без потреби у базовій DEM. Сукупно ці інструменти, хоча розширили здатність проводити флювіальний та ландшафтний аналізи вищого порядку, однак усі ці інструменти потребують знань обчислювальних мов у потенційно незнайомих обчислювальних середовищах. Понад це, ці інструменти значною мірою зосереджені на окресленні та вилученні морфометричних показників, характерних лише для річкової мережі, і застосовуються, зазвичай, для середніх і великих водозборів. Автори цього дослідження також наголошують, що менше уваги приділяли розробленню повністю автоматизованих інструментів для поділу ландшафтів на їх складові гідрогеоморфологічні одиниці або дискретизації характеристик річкових коридорів, і як альтернативу пропонують новий набір інструментів ArcGIS із відкритим вихідним кодом під назвою AppLied (USUAL) Watershed Tools Університету штату Юта.

Нові алгоритми також охоплюють визначення меж вододілу на підставі карт ухилів рельєфу, визначених з DEM, програми для автоматизації ручних операцій, які зараз виконують для окреслення водотоків і меж водозбору. У роботі [6] запропоновано ефективну модель для швидкого окреслення вододілу на будь-якій території з використанням теоретико-графових підходів. Підхід авторів використовує три алгоритми та приймає як вхідні дані стандартну DEM, отриману сітку напрямків потоку (D8) або межі водозбірної басейну, що досягають потоку, і виводить похідні межі вододілу. За результатами дослідження [12], науковці представили методологію оброблення DEM, щоб полегшити інтерактивне окреслення вододілу та вилучення водотокової мережі. Робочий процес базувався на інструментах, доступних у наборі інструментів ArcGIS 10.1; зокрема було використано інструменти з розширення Spatial Analyst. Окремі інструменти було об'єднано за допомогою ArcGIS Model Builder для пакетного оброблення. Автори статті наголошують на важливості застосування нових підходів із залученням даних дистанційного зондування і обробленні за допомогою географічних інформаційних систем з додатковою доступністю цифрових моделей висоти високої роздільної здатності із супутників спостереження Землі.

Численними в літературі є дослідження, де для прискорення створення моделі зменшується частота ви-

хідної DEM і перевіряється вплив цієї операції на точність отриманих результатів. DEM з різних джерел і різної роздільної здатності було проаналізовано, наприклад, у наукових працях [9, 18, 20, 22]. Зокрема, дослідження [18] проведено внаслідок зіткнення з реальними проблемами, спричиненими роздільною здатністю DEM у водозбірній зоні Згловенчка (Польща), 90 км², на рівнинній сільськогосподарській території. Помилки можуть проявлятися у вигляді відсутності коригування висоти деяких будівель і споруд, таких як мости та водопропускні труби, а низька роздільна здатність DEM може зумовити значні похибки у визначенні водотоків і меж вододілів.

У роботі [9] автори подали новий підхід до подолання проблеми відсутності опорних точок висоти на заплаві віддаленого регіону способом поєднання зареєстрованих геодезичних знаків і наземних контрольних точок ICESat для спільної реєстрації цифрової моделі рельєфу місцевості.

У роботі [20] обґрунтовано доведено, що визначення критичних джерел дифузного забруднення CSA (*англ. Critical Source Areas*) у сільськогосподарських водозбірних басейнах залежить від точного розмежування гідрологічно чутливих територій HSA (*Hydrologically Sensitive Areas*), які мають найвищий ризик утворення шляхів поверхневого стоку. Показано, що у топографічно складних ландшафтах це розмежування обмежене роздільною здатністю DEM і впливом мікротопографічних особливостей. Щоб вирішити цю проблему, було досліджено оптимальну роздільну здатність і щільність точок для просторового моделювання HSA для подальшого використання за окреслення CSA.

Результати дослідження [22] також показують, що DEM з високою роздільною здатністю, отримані за допомогою LiDAR, створюють детальніші гідрографічні характеристики, а вплив роздільної здатності DEM, отриманої за допомогою LiDAR на визначення гідрографічних характеристик, є чітко очевидним.

Деякі проекти використовують LiDAR в Україні для специфічних завдань. Наприклад, за даними Державного агентства лісових ресурсів, у 2024 р. в рамках пілотного проєкту Україна вперше застосовувала лазерне сканування для оцінювання запасів деревини в межах двох ділянок площею 18 і 15 га на базі філії "Вінницьке лісове господарство". Однак загальнодоступних LiDAR-даних для України наразі немає, оскільки така інформація може мати статус конфіденційної або бути обмеженою з міркувань національної безпеки. Окрім цього, LiDAR-вартісна технологія і потребує спеціалізованого обладнання, що робить його менш доступним, зокрема для розмежування та пріоритизації низькопорядкових водозборів.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженні застосовано методи геопросторового оброблення даних, підготовки цифрових моделей рельєфу та геопросторового аналізу водозборів, а також дешифрування супутникових знімків, результати і матеріали прямих польових досліджень для виявлення антропогенно модифікованих та штучно створених елементів потокової мережі. Напівавтоматичне розмежування цільових низькопорядкових водозборів виконували із використанням програмного інтерфейсу інструменту QSWAT+ на підставі DEM: SRTM 1 Arc-Second Global (роздільна здатність ~30 м), Підготовку, оброблення та картографічний аналіз даних проводили з використанням: крос-

платформенної геоінформаційної системи Q-GIS (англ. Quantum Geoinformation System), системи автоматизованого геонаукового аналізу SAGA-GIS (англ. *System for Automated Geoscientific Analyses*) та програмного забезпечення Google Earth Pro 7.3.6.9796.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Підготовка цифрової моделі рельєфу. Цифрову модель рельєфу (SRTM 1 Arc-Second Global) з роздільною здатністю одна кутова секунда (~30 метрів) для досліджуваної території басейну Млинівки Стебницької (територія Івано-Франківської, Лисецької, Старобогородчанської та Богородчанської територіальних громад) було попередньо завантажено у форматі GeoTIFF із платформи EarthExplorer, способом вибору екстенту за визначеними координатами, перепроєкційована та перевірена на наявність значних помилок у висотах на місцевості. Найістотніші спотворення цифрової моделі рельєфу виявлено на ділянках із суцільним лісовим покривом (лісовий масив ур. "Мочари", Осмолодське лісництво) та на ділянках із суцільними прибережними деревостанами вздовж руслового коридору водотоку.

Висота на території із суцільним деревостаном на 10-15 м перевищувала дійсну висоту поверхні рельєфу, що відповідає висоті дерев. Використання інструментів фільтрації, наприклад "DTM Filter (slope-based)" не забезпечувало досягнення бажаного результату і не дало можливість прибрати об'єкти, такі як дерева чи будівлі, що впливають на коректність генерації потокової мере-

жі. Для ліквідації спотворених ділянок DEM, було створено векторний полігональний об'єкт, що відповідає ділянкам зі спотворенням висот. Детальне оцифрування проведено у середовищі програмного забезпечення Google Earth Pro способом масштабування (зумування) до рівня високої деталізації елементів ландшафту (рис. 1). Полігональні об'єкти окремим файлом у форматі KML експортовано в програмне середовище QGIS, перепроєкційовано та використано для створення відповідної інвертованої маски.

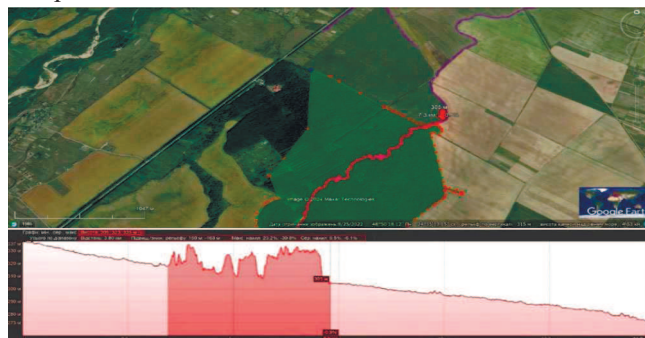


Рис. 1. Відтворення полігонального об'єкта зі спотвореними елементами висоти рельєфу в межах басейну Млинівки Стебницької (урочище "Мочари") в середовищі Google Earth Pro / Reconstruction of a polygonal object with distorted elevation elements within the Mlynivka Stebnytska Basin (Mochary Tract) in the Google Earth Pro

Оброблення растрового файлу DEM виконано способом вирізування з нього спотворених ділянок за створеним шаром інвертованої маски (рис. 2 і 3).

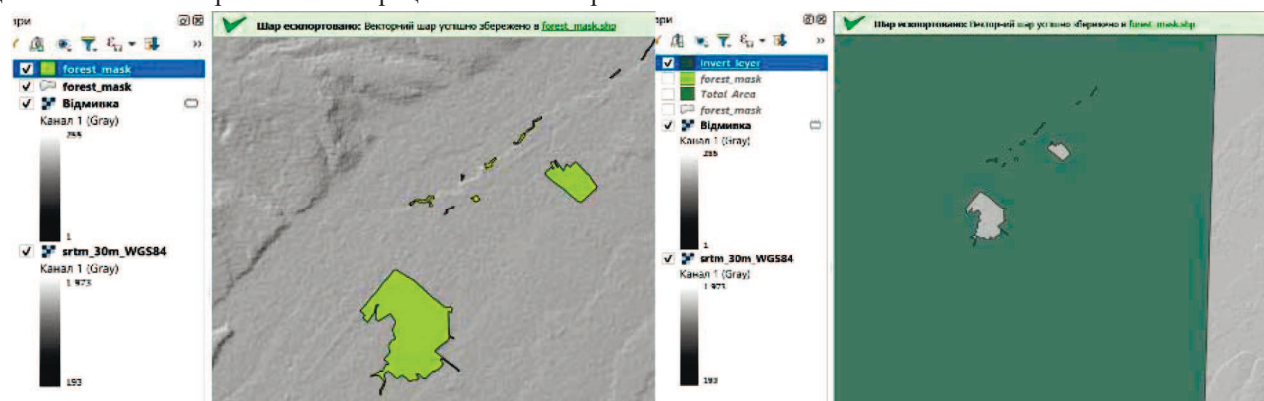


Рис. 2. Експортований шар полігональних об'єктів зі спотвореними висотами (лісові ділянки) на території досліджень та інвертована маска для оброблення DEM / Exported layer of polygonal objects with distorted elevations (forest-covered areas) in the study area and an inverted mask for DEM processing

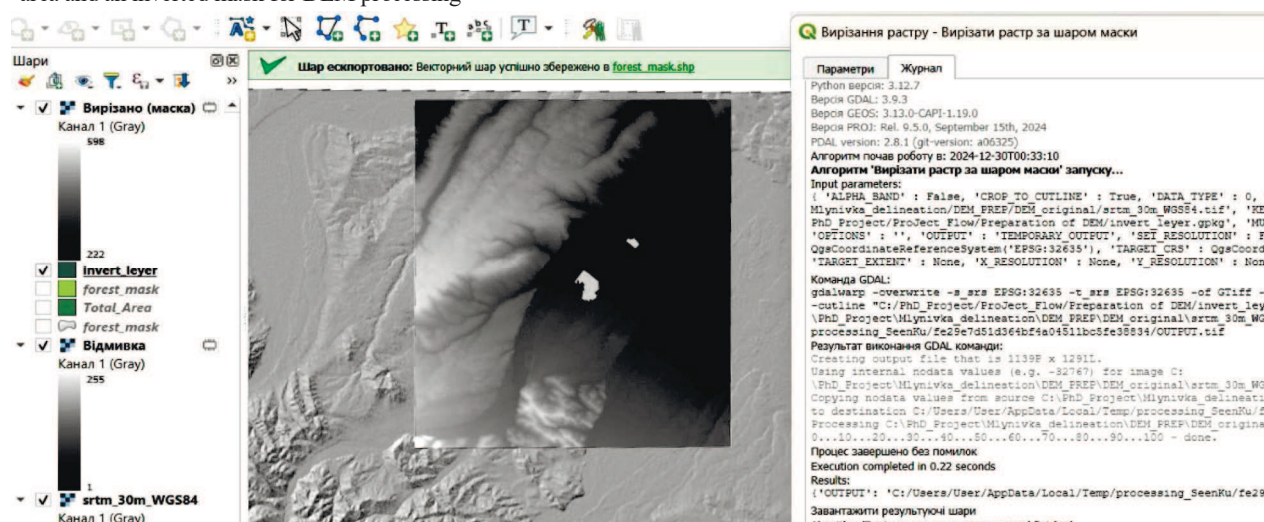


Рис. 3. Цифрова модель рельєфу з вилученими спотвореними ділянками висот / Digital elevation model with removed distorted elevation areas

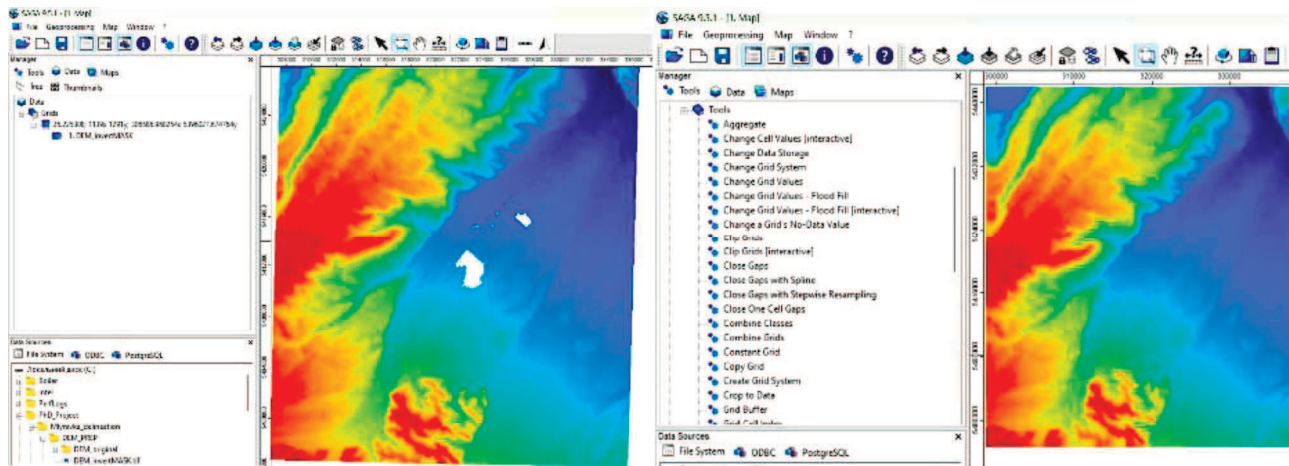


Рис. 4. DEM-території досліджень до та після застосування інструменту Close Gaps with Stepwise Resampling у програмі SAGA GIS / DEM of the study area before and after applying the Close Gaps with Stepwise Resampling tool in SAGA GIS

Для заповнення отриманих областей з відсутніми значеннями висот DEM завантажено у SAGA GIS. Це потужне програмне забезпечення з відкритим кодом для геооброблення та просторового аналізу даних. У поєднанні з QGIS, яке є інтерфейсом для різноманітних інструментів геооброблення, SAGA GIS надає додаткові можливості для аналізу просторових даних. Для заповнення порожнин і прогалів у DEM застосовано функцію Close Gaps with Stepwise Resampling (O. Conrad © 2012) із вибором B-spline інтерполяції, як методу заповнення (рис. 4).

Для зменшення шуму та дрібних варіацій у даних DEM, що можуть виникати через помилки у збиранні даних або внаслідок явищ, які не є частиною основного рельєфу, застосовано Gaussian Filter (O. Conrad, 2008).

Створення еталонних векторних шарів для випробування процедури розмежування водозбору. Век-

торні шари створено способом оцифрування цільових елементів у середовищі програмного забезпечення Google Earth Pro з подальшим експортом KML-файлу в середовище Q-GIS для коригування сполучень потоків і каналів у вузлах. Кінцевий shp-файл перепроєкційовано в систему координат EPSG:32635 – WGS 84 / UTM zone 35N. Первинний векторний шар (рис. 5) потокової мережі для випробування напівавтоматичного розмежування створено на базі наукових даних [23] про основні дієві русла водотоків Млинівки Стебницької та Радчанки. Для демонстрації порівняння, на першому етапі не враховували штучні (антропогенні) елементи гідромережі, зокрема меліоративні канали та водоприймачі сільськогосподарських осушувальних систем, придорожні канами та водовідводи, які не є складовою частиною державного водного кадастру, а також не позначені в геоінформаційних системах.

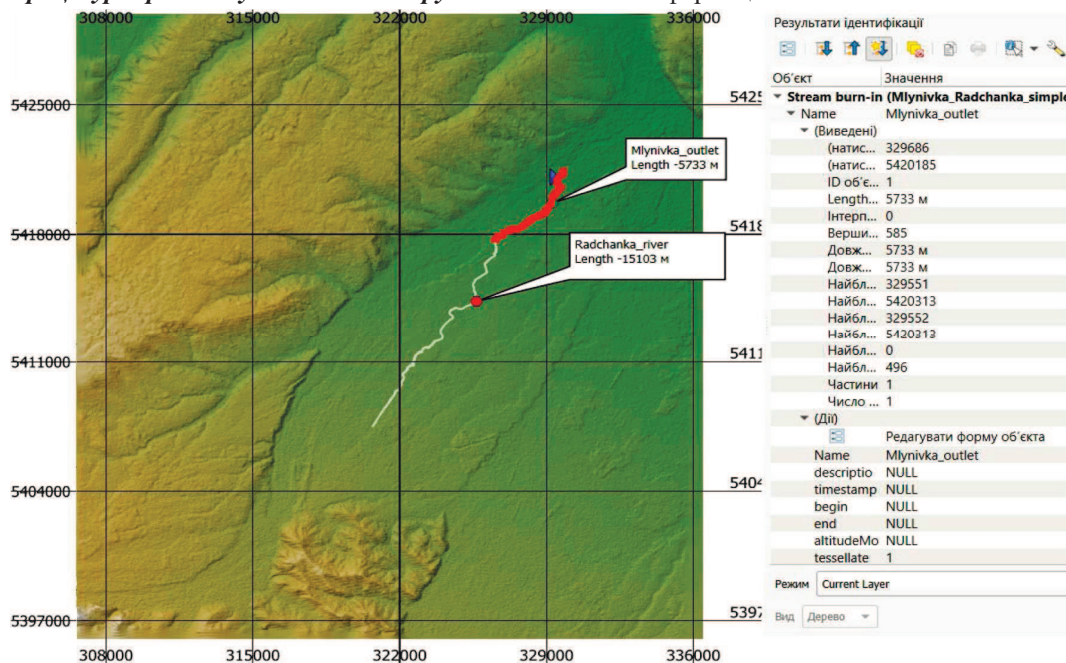


Рис. 5. Векторний шар у середовищі QGIS: центральне (голове русло) гідросистеми Млинівки Стебницької з притокою Радчанкою / Vector layer in the QGIS environment: the central (main channel) of the Mlynivka-Stebnytska hydrosystem with its tributary, the Radchanka River

Отже, за результатами оцифрування для первинного шару еталонної мережі потоків цільового водозбору Млинівки Стебницької визначено всього два залежних об'єкти: русло Млинівки Стебницької з активною течією на проміжку від місця впадіння притоки Радчанки

до гирла (5,7 км) та видозмінене основне русло Радчанки від найвіддаленішої точки до гирла (14,7 км). Рисунок гідромережі для вибраних водотоків найнижчого гідрологічного порядку подано для більшості геоінформаційних платформ саме з таким рівнем деталізації.

Цей рисунок не охоплює значної частини русла Млинівки Стебницької до місця впадіння притоки Радчанки з причин значного штучного зарегулювання та осушення русла, втрати стоку, зокрема й на тлі стійких змін кліматичних факторів.

Другий, уточнений, векторний шар каналів і потоків (рис. 6) цієї гідросистеми було створено за тією ж самою схемою на підставі даних про розташування всіх без винятку елементів потокової мережі Млинівки Стебницької природного та антропогенного походження: природних джерел з вільним поверхневим стоком, штучних придорожніх, меліоративних каналів та ефемерних ділянок природного русла Млинівки Стебницької у верхній течії, які мають зв'язок з головним руслом і володіють високим потенціалом формування значних об'ємів стоку під час реалізації сценаріїв стійкого інтенсивного зволоження.

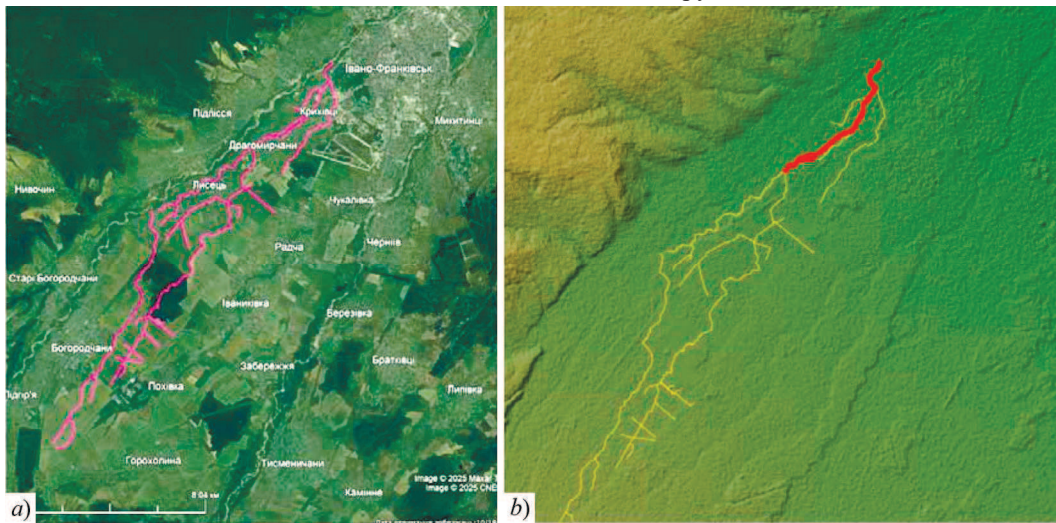


Рис. 6. Скоригований векторний шар мережі каналів і потоків гідросистеми Млинівки Стебницької за даними польової перевірки / Adjusted vector layer of the channel and stream network of the Mlynivka Stebnytska hydrosystem based on field verification data [23]



Рис. 7. Елементи потокової мережі водозбору р. Млинівки Стебницької, (польові дослідження 2023-2024 рр.) / Anthropogenic elements of the stream network of the Mlynivka Stebnytska River catchment (field studies 2023-2024) [23]

Налаштування параметрів середовища інструменту QSWAT⁺. SWAT (англ. *Soil and Water Assessment*

Tool) є одним із провідних інструментів для моделювання водного балансу та поширення забруднень у водоз-

бірних басейнах, і використовується для прогнозування впливу різних сценаріїв управління землями й водними ресурсами на якість води, гідрологію та ерозійні процеси. Водозбірний басейн поділяють на суббасейни, які далі ділять на гомогенні гідрологічні реакційні одиниці (HRUs). Використання програмних функцій SWAT може бути зручним інструментом розмежування водозборів різних рангів із широкими можливостями подальшого використання. Первинне налаштування параметрів проводять у головному початковому вікні QSWAT+. Вибір параметрів (табл. 1) проведено з урахуванням особливостей території дослідження з головним акцентом на мікромасштаби цільових водозборів.

Табл. 1. Параметри налаштування QSWAT+ / QSWAT+ configuration parameters

Параметр	Значення	Опис
Channel width multiplier	1,0	Множник для середньої ширини каналів
Channel depth multiplier	0,13	Множник для середньої глибини каналів
Channel width exponent	0,4	Коригування ширини каналів відповідно до реальних умов
Channel depth exponent	0,3	Коригування глибини каналів відповідно до реальних умов
Reach slopes	1,0	Множник для ухилів головних каналів
Main channel length	1,0	Множник для довжин головних каналів
Tributary slopes	1,0	Множник для ухилів приток
Tributary channel length	1,0	Множник для довжин приток
Mean slopes	1,0	Множник для середніх ухилів

Напівавтоматичне розмежування водозбірного басейну з використанням функції "Burn in existing stream

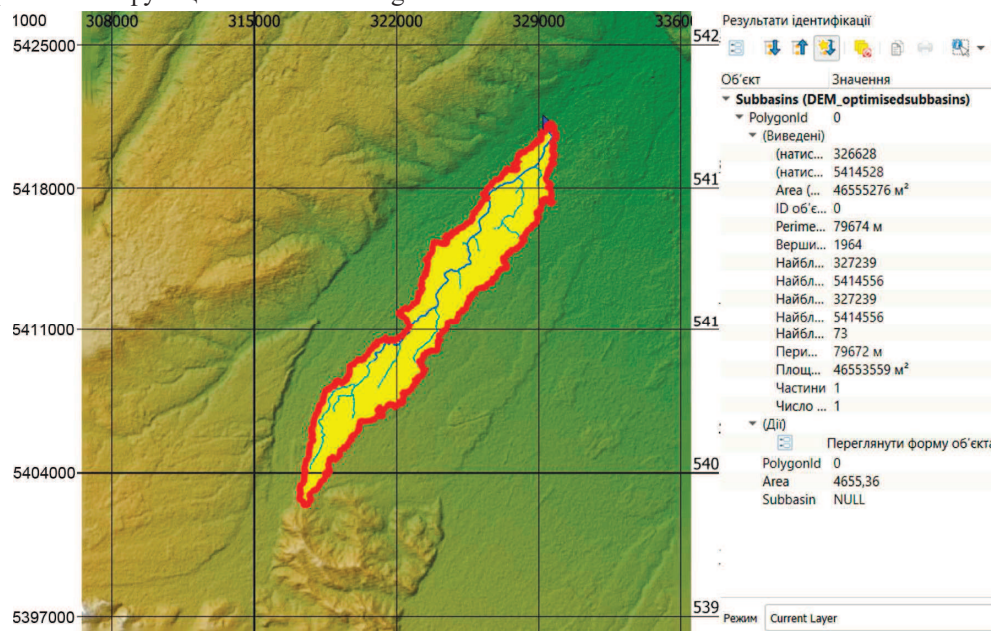


Рис. 8. Результат напівавтоматичного розмежування водозбірного басейну водотоку Млинівки Стебницької у середовищі QSWAT+ на підставі первинного еталонного векторного шару основного русла / Result of the semi-automatic delineation of the Mlynivka Stebnytska stream catchment in the QSWAT+ environment based on the primary reference vector layer of the main channel

Площа басейну за результатами повторного окреслення становила 40,32 км². Внесення русла Стебника до векторного шару остаточно дало б можливість чітко розмежувати водозбори водотоків Стебник та Радчанки, що відповідає сучасному вигляду. Польова перевірка, як додатковий методичний крок, обґрунтовує доцільність та можливість вибору цифрової моделі висоти із

network" випробували для двох підготовлених еталонних векторних шарів потокової мережі. Порогові значення площі охоплення для створення каналів і потоків (channel threshold та stream threshold) було налаштовано з урахуванням невеликих розмірів цільового басейну та невеликої довжини елементів гідромережі: для каналів – 500 пікселів (приблизно 0,34 км²), для потоків – 6500 пікселів (близько 4,5 км²).

Результати "випалювання" гідромережі (рис. 8 і 9) з використанням первинного еталонного векторного шару демонструють істотні помилки і невідповідності як у згенерованій потоковій мережі, так і в окресленому басейні загалом. Це можна пояснити недостатньою роздільною здатністю цифрової моделі рельєфу та незначним коливанням висот місцевості у межах Бистрицької улоговини (плоска рівнина територія). Отже, просте застосування алгоритму без залучення векторного шару гідромережі, або з його недостатньою деталізацією, не дає змоги згенерувати можливі її елементи на DEM автоматично з високою подібністю.

Важливо зазначити, що запуск операції, орієнтованої на таку малу за площею територію, призвів ще й до асиміляції частини басейну річки Стебник, витoki якої розташовані неподалік видозмінених витоків річки Радчанка, а також до значного витягування віддалених витоків Радчанки у південно-західному напрямку, що істотно збільшило площу окресленого водозбору до 46,55 км². Запуск процесу розмежування вдруге із використанням створеного еталонного векторного шару мережі каналів за результатами польової перевірки дав змогу виправити більшість спричинених помилок.

середньою роздільною здатністю (30 м) для передбачених цілей. Зокрема, в умовах малопересіченої території басейну р. Млинівки Стебницької деталізована польова перевірка елементів потокової мережі та зв'язку природних і штучних каналів з основним руслом, дала можливість їх ідентифікувати та нанести на супутникові знімки зі значно вищою точністю, що істотно змен-

шило помилки автоматичного розмежування, потенційно зумовлені недостатньою роздільною здатністю DEM-зображень.

Налаштування параметрів середовища QSWAT+ та застосування деталізованого векторного шару, дало можливість згенерувати потоки і канали з високою подібністю до еталонного шару. Окрім цього, в другому варі-

анті розмежування також відтворено частини русла Млинівки Стебницької з непостійним (ефемерним) стоком від с. Стебник до с. Драгомирчани, а також більшість прямолінійних меліоративних та придорожніх каналів, що мають зв'язок з р. Радчанка вище та нижче від лісового масиву урочища "Мочари", які було створено під час меліоративних осушувальних робіт на цій території.

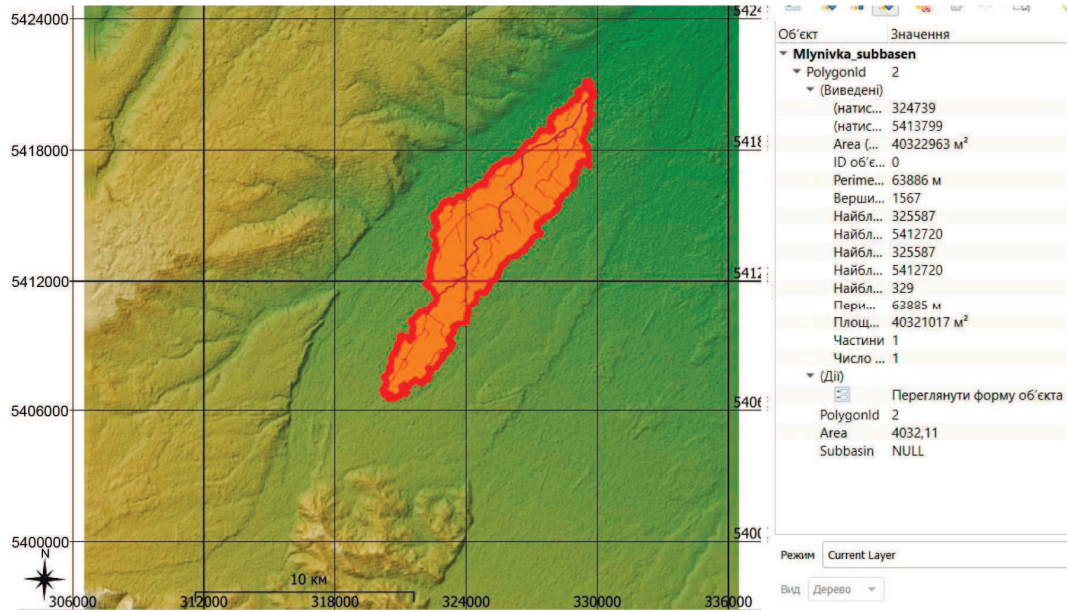


Рис. 9. Результат напівавтоматичного розмежування водозбірного басейну водотоку Млинівки Стебницької у середовищі QSWAT+ на підставі скоригованого за результатами польової перевірки еталонного векторного шару мережі каналів і потоків / Result of the semi-automatic delineation of the Mlynivka Stebnytska stream catchment in the QSWAT+ environment based on the reference vector layer of the channel and stream network, adjusted according to field verification results

Отримане значення площі водозбору зіставили з даними про визначення площі басейну водотоку Млинівка Стебницька в межах проєктних досліджень [23], де площу водозбору отримано поділом території досліджень на окремі гіпсометричні профілі з оцінкою межових точок перепаду абсолютних позначок, та перевіркою за даними топографічних даних: мапи Івано-Франківська М-35-110, 1990 р. масштабу 1:100000 та топографічної карти масштабу 1:100000 Військового інституту географії, Польща 1932 р.

Встановлено, що значення площі, отримане у процесі напівавтоматичного розмежування в середовищі QSWAT+, на 6,32 км² перевищує площу басейну 34 км², отриману методом картографічного опрацювання. Для встановлення істотності помилок, різниця між отриманими результатами потребувала аналізу на просторового збігу. Отже, для оцінювання подібності та ступеня сходження двох полігональних об'єктів, якими є водозбірні басейни, що отримані у різний спосіб, розраховували Індекс Жаккара (Jaccard Index), що вимірює подібність між множинами, і визначають як міру спільної частини, поділену на міру об'єднання множин (рис. 10):

$$J(A,B)=\frac{|A\cap B|}{|A\cup B|}=\frac{A\cap B}{|A|+|B|-|A\cap B|}.$$

де: $|A\cap B|$ – площа перетину окресленого (A) та еталонного (B) водозборів; $|A\cup B|$ – площа об'єднання окресленого та еталонного водозборів.

При $J = 1$ – ідеальна відповідність, полігони повністю збігаються; при $J = 0$ – відсутність збігу, полігони не мають спільної площі. Значення J у межах 0,7-1,0 свідчать про високу точність окреслення. Значення нижче

ніж 0,5 можуть вказувати на істотні розбіжності у формах або площах об'єктів.

Значення басейну з площею 34 км² вибрано як базове (еталонне), за яким проведено розрахунок для двох варіантів напівавтоматичного розмежування (табл. 2) з використанням первинного та скоригованого еталонних векторних шарів потокової мережі.

Табл. 2. Розрахунок індексу Жаккара для оцінювання подібності між результатами напівавтоматичного розмежування басейну Млинівки Стебницької / Calculation of the Jaccard index for assessing the similarity between the results of the semi-automatic delineation of the Mlynivka Stebnytska basin

Розрахунковий параметр	Напівавтоматичне розмежування QSWAT+	
	1. Первинний еталонний векторний шар потокової мережі	2. Скоригований еталонний векторний шар потокової мережі (на підставі польової перевірки)
Площа водозбору за результатами напівавтоматичного розмежування	46,55 км²	40,32 км²
$ A\cap B $ – площа перетину окресленого (A) та еталонного (B) водозборів	28,36 км²	32,20 км²
$ A\cup B $ – площа об'єднання окресленого (A) та еталонного (B) водозборів	52,30 км²	42,23 км²
Індекс Жаккара (Jaccard Index)	0,54	0,76

Результати застосування алгоритму, виконаного в цьому дослідженні, показали, що для першого варіанта напівавтоматичного розмежування характерний помірний або слабкий рівень відповідності ($J = 0,54$), зі знач-

ними просторовими спотвореннями, що спричинені інтеграцією з іншими низькопорядковими водозборами. Повторне розмежування після коригування векторного шару потокової мережі за результатами польових обстежень, підвищило індекс Жаккара до 0,76, що свід-

чить про значно кращу збіжність окресленого водозбору з еталонним і доводить важливість польової перевірки антропогенно модифікованих та змінених елементів потокової мережі, особливо найвіддаленіших (периферійних).

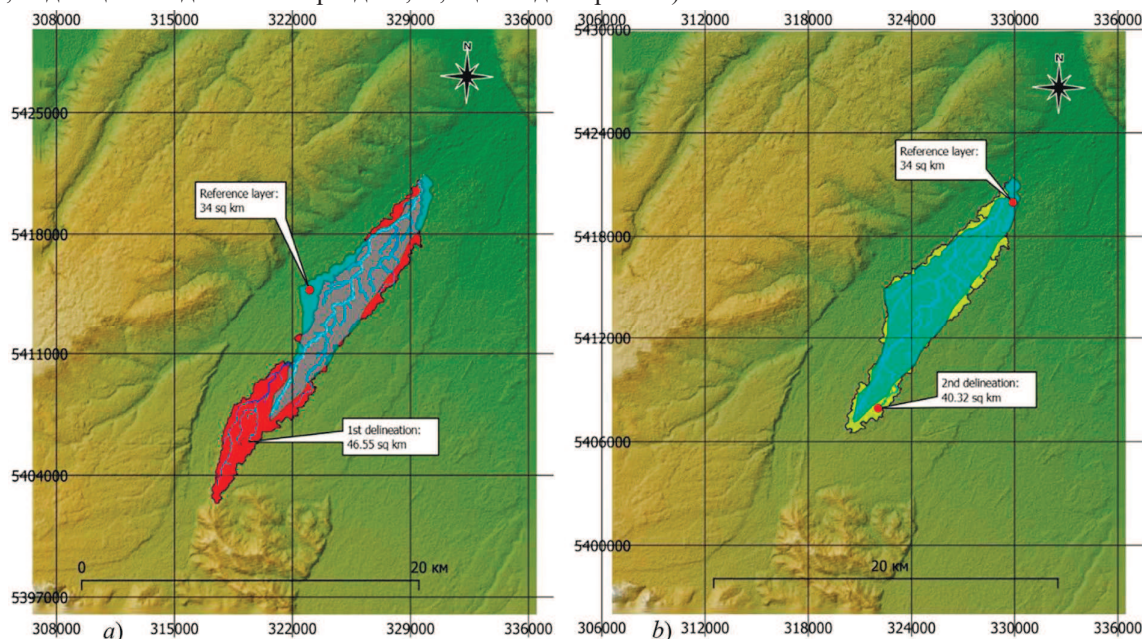


Рис. 10. Візуалізація просторового накладання водозбору Млинівки Стебницької з еталонним водозбором в QGIS для першого (зліва) і другого (справа) варіантів розмежування / Visualization of the spatial overlay of the Mlynivka Stebnytska catchment with the reference catchment in QGIS for the first (left) and second (right) delineation options

В умовах сильно модифікованої гідрологічної мережі (наприклад, сільськогосподарські території, меліоративні канали, ефемерні потоки), а також різноманітних спотворень висоти, таких як висота дерев, додаткове попереднє оброблення DEM-зображення з використанням фільтрів згладжування, заповнення западин та повторної інтерполяції на базі програмних інструментів QGIS і SAGA-GIS, забезпечило достатню точність для ідентифікації вододільних ліній малого водотоку і напрямків стоку із площі басейну, та ефективність вбудованих програмних функцій QSWAT+, незважаючи на середню роздільну здатність, та малопересічену місцевість цільового водозбору.

Остаточну розбіжність між значенням площ водозборів Млинівки Стебницької, отриманим у процесі напівавтоматичного окреслення в середовищі QSWAT+, що становить +6,32 км² (18 % від еталонного, яке було отримане методом картографічного опрацювання), можна пояснити, з одного боку, значним картографічним узагальненням, що визначається щільністю розміщення гіпсометричних профілів під час встановлення меж водозбору картографічним (ручним) способом, а з іншого – вкрай низьким коливанням позначок рельєфу в межах території, та ймовірними залишковими неточностями DEM, що спричинені наявністю територій із урбанізованим ландшафтом приміської зони Івано-Франківська. Тому отримане остаточне відхилення не обов'язково повністю пов'язане з роздільною здатністю DEM.

Для демонстрації придатності та випробування, процедуру розмежування виконано ще для двох окремих низькопорядкових водозборів після попередніх польових маршрутних спостережень (перевірки зв'язку з руслом in-situ) для найбільш віддалених елементів потокової мережі в межах кожного водозбору, які реалізував автор упродовж 2024-2025 рр., а також з урахуванням

результатів опрацювання картографічних матеріалів, планів території та науково проєктних відомостей про регулювання водотоків у межах території дослідження. Увагу зосереджено на низькопорядкових водозборах у різних ландшафтно-екологічних та геоморфологічних умовах: 1) водозбір річки Черешеньки (ліва притока Бистриці-Солотвинської), що перебуває в умовах антропогенних змін, має регульований стік і не була вивчена раніше в екологічному контексті; 2) водозбір річки Бересток, правої притоки Дністра в межах Коломийського району (територія населених пунктів сіл Олієво-Королівка, Семенівка, Раковець), стік якої формується в умовах гідрологічно чутливого сільського агроландшафту на схилі землях, що може створювати значний потенційний екосистемно-гідрологічний ризик та ризик для здоров'я місцевого населення, і потребує старту процесу відповідного наукового опрацювання.

Випробування алгоритму на прикладі струмка Черешенька (Івано-Франківський район) та річки Бересток (Коломийський район) (рис. 11) продемонструвало достатньо високу ефективність її використання у визначенні меж водозборів у різних ландшафтних і геоморфологічних умовах. Для водозбору струмка Черешенька, протяжність якого становить лише 6 км, алгоритм дозволив отримати площу водозбору 10,4 км². Площу водозбору цього струмка на околицях Івано-Франківська не було встановлено раніше.

У сільськогосподарських ландшафтах із вираженою хвилястістю рельєфу алгоритм відтворив площу водозбору річки Бересток (71,5 км²) з точністю 97 % відносно даних "Каталогу річок України" (1957 р). Це підтверджує можливість застосування запропонованого підходу для розмежування водозборів водотоків найнижчого порядку для планування їхнього відновлення, що відповідає нашій концепції.

Окрім цього, завдяки поєднанню DEM 30 м із польовою верифікацією і векторними шарами актуалізованої гідрографічної мережі (включно з антропогенно зміненими руслами), досягають високої достовірності моделювання навіть у разі штучного перерозподілу стоку. Це особливо важливо для цільового розмежування водозборів найнижчого порядку, що є потенційними об'єктами відновлення природи в межах агроландшафтів і приміських зон.

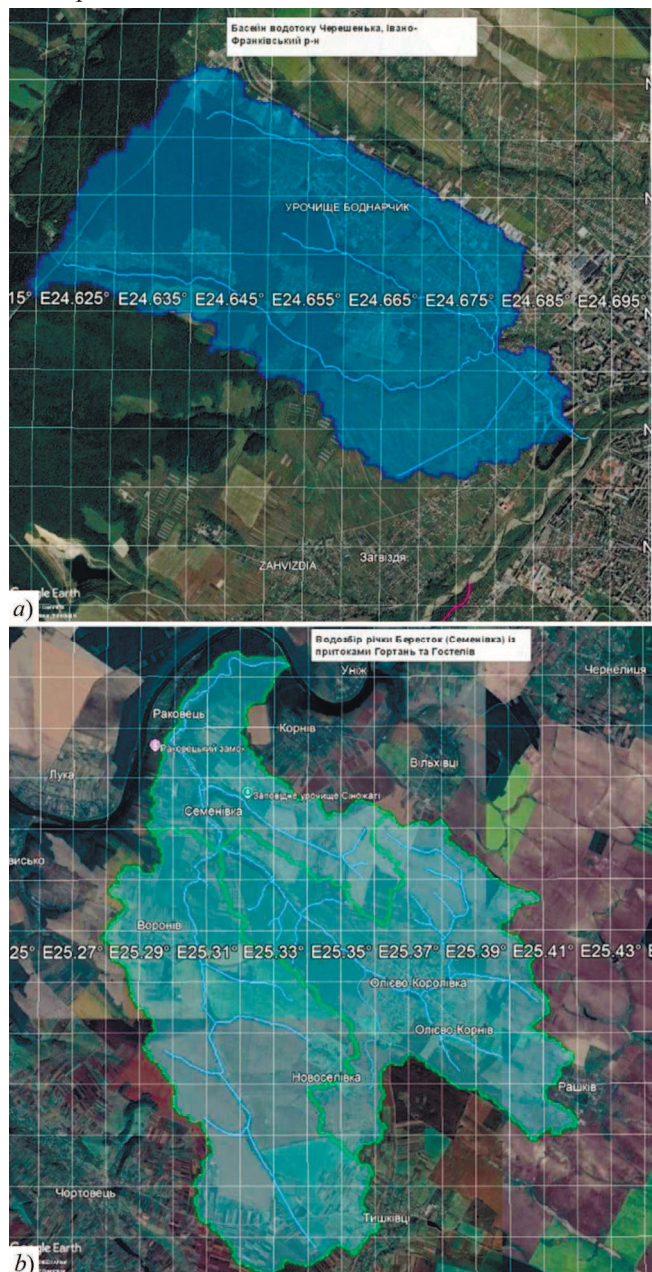


Рис. 11. Водозбори річок Черешеньки (Івано-Франківський р-н) та Бересток (Коломийський р-н), отримані шляхом напівавтоматичного розмежування з використанням інструменту QSWAT+ та експортовані в програмне середовище Google Earth Pro / Catchments of the Chereshenka River (Ivano-Frankivsk District) and the Berestok River (Kolomyia District), obtained through semi-automatic delineation using the QSWAT+ tool and exported to the software environment of Google Earth Pro

Обговорення результатів дослідження. У роботі [8] наведено інноваційний підхід до вивчення та аналізу антропогенних впливів на території, межі яких обмежені вододілом малої та середньої річок, в якому застосування геоінформаційних технологій, зокрема гідрологічних інструментів модуля Spatial Analyst програмного

забезпечення ArcGIS Desktop, а також цифрових моделей рельєфу ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) версії 3.0, що дало змогу створити точну геопросторову модель антропогенних перетворень вододілу р. Оріль у межах Дніпропетровської області (Україна). Моделювання проводили в кілька етапів, зокрема: заповнення хибних западин (Fill), створення растру напрямку потоку (Flow Direction), створення растру точки прив'язки (Snap Pour Point), нагромадження потоку (Flow Accumulation) і об'єднання точок прив'язки гирла і джерел (Merging). За результатами, автори зробили висновок, що сконструйована вододілова територія може слугувати фундаментальною просторовою структурою, сприяючи ретельному аналізу та категоризації різних типів земель та їх атрибутів у межах досліджуваної території.

У роботі [14] застосовано техніку примусового контролю потоку (інструмент "Випалювання потоку"), яка фізично змінює DEM способом вирізання нових каналів для примусового вирівнювання, для того, щоб алгоритми потоку створювали моделі дренажу, які відповідають нанесеній на карту гідрографії з вищою точністю та з урахуванням різноманітних модифікацій.

У роботі [21] автори також використовували QGIS для розмежування вододілів, а функцію "спалювання" було застосовано для покращення ефективності в автоматизованому розмежуванні потокової мережі на підставі DEM.

У роботі [13] досліджено водозбірний басейн річки Коум у штаті Тамілнад, Індія, та здійснено порівняльне оцінювання методів ручного розмежування з підходами на основі ГІС, використовуючи цифрові моделі рельєфу з ASTER і GM-TED. Аналіз охоплює зміни в річковій мережі між 1999 і 2010 рр. та перевірку даних ГІС за допомогою GPS-вхідних даних для оцінювання точності автоматизованих методів розмежування. Результати підкреслюють ефективність ГІС у генерації річкових мереж, при цьому враховано обмеження, такі як помилки геоприв'язки.

У роботі [10] продемонстровано алгоритм, за яким водозбори річок Aglar UP (99,65 км²), Paligaad (59,78 км²) і Balganga (13,12 км²), розташовані у Малих Гімалаях у блоці Джаунпур штату Уттаракханд, на висоті 670–2975 м, були точно окреслені на базі ArcGIS на підставі даних про висоту Cartosat-1 DEM з роздільною здатністю 30 м, що дало змогу кількісно визначити геоморфометричні параметри та їх характеристики для визначення пріоритетності вододілу за допомогою підходу дистанційного зондування і ГІС, а також зв'язати геоморфологічні параметри з гідрологічними характеристиками вододілу.

Для уникнення обмежень, накладених роздільною здатністю DEM на район водозбору, у роботі [15] також використано попередньо визначений шейп-файл (розрахований за алгоритмом D8 на підставі DEM 1 м), позаяк площа вододілу на DEM 30 м була результатом нерелективного узагальнення меж вододілу через розмір комірки суперпікселя (30×30 м). Це призвело до більш реалістичного зображення водозбору навіть на DEM (30 м), з урахуванням того, що він розташований на відносно плоскій ділянці з низькою амплітудою на значеннях висот, що фактично відповідає умовам басейну р. Млинівки Стебницької, який також розташований на

платіній поверхні Бистрицької улоговини із вкрай слабким коливанням абсолютних позначок.

У роботі [16] підтверджено, що там, де водозбори не відповідають механізмам природного вільнопотокового виходу, і містять антропогенно створені перешкоди, чи модифікації потокової мережі, це створює проблеми з правильною ідентифікацією потоків та визначенням меж водозборів. Відповідно заздалегідь визначена та інтегрована потокова мережа має вирішальне значення.

Для точного окреслення водозбору Сімоїоки [2] з використанням інструменту SWAT, автори врахували складну систему дренажних каналів на торфовищах. Використовуючи аерофотознімки, складено базу даних дренажу, та інтегровано шейп-файл каналів у високоточне DEM (1×1 м) "випалюванням" в ArcSWAT. Коригування рельєфу дало можливість точно визначити потоки та виходи, що пройшло верифікацію за даними NLSF. У підсумку було виділено 111 підводозборів, що покращило просторову точність моделі. Окрім цього, показано, що методи створення еталонного векторного шару потокової мережі для розмежування водозборів з модифікованими умовами та штучним перерозподілом стоку можуть відрізнятися за детальністю та точністю залежно від остаточної мети.

У роботі [7] зазначено, що місцеві громади повинні відіграти вирішальну роль як у розробленні візії майбутніх екосистем, так і у впровадженні заходів для досягнення цього бачення [11]. Окрім цього, у роботі [11] обґрунтовано вибір низькопорядкових водозборів для реалізації концепційних основ пошуку та екодіагностики зон ризику на водозборах, ефективного екологічного управління землекористуванням та водною галуззю. У цьому контексті, використання просторових даних про водозбори малих водотоків, які зазнають безпрецедентної деградації в умовах розорювання "впритул до русел" може стати основою для розроблення планів детального просторового розвитку територій громад, забезпечуючи науково обґрунтовану базу для прийняття рішень щодо екологічної реставрації деградованих ландшафтів.

У роботі [1] розглянуто концепції ефективного планування на підставі окреслення меж вододілу, де картографічні дані інтегрують міські, архітектурні, сільськогосподарські та гідрологічні розмежування, а встановлення меж конкретних вододілів має вирішальне значення для реалізації цілеспрямованих стратегій втручання в сільську та міську місцевість.

Унаслідок обговорення результатів останніх досліджень встановлено, що більшість методів та алгоритмів автоматичного (без залучення додаткових даних про потокову мережу) та напівавтоматичного розмежування з використанням інструменту "випалювання векторним шаром" DEM-зображень на базі ГІС було випробувано з одночасним оцінюванням точності для водозборів середніх і великих масштабів, що може виявитися складним у реалізації водозбірних принципів у масштабі громад, та участі останніх у реалізації політики відновлення екосистем, захисту земельних і водних ресурсів. Це підтверджує доцільність та новизну запропонованого нами методу, який орієнтується на масштаби мікрводозборів водотоків найнижчого порядку, під якими ми розуміємо окремі струмки, безіменні потоки та притоки малих річок, які часто відсутні у водному кадастрі. Окрім цього, унікальності і точності методу було досягнуто

внаслідок інтеграції мережі дрібних потоків і струмків, зокрема і штучно створених каналів відкритого дренажу (меліоративних та придорожніх) у DEM середньої роздільної здатності, що стало можливим завдяки інтеграції даних дистанційного зондування та проведення детальніших польових обстежень з підтвердженням потенційного зв'язку віддалених антропогенних елементів потокової мережі з основним руслом в межах цільових водозборів. Отже, застосування випробуваного підходу доводить, що в умовах недоступності високоточних даних, DEM (30 м) може виступати функціонально доцільним джерелом просторових даних, здатним забезпечити достатньо ефективне напівавтоматичне розмежування низькопорядкових водозборів для цілей планування та контролю їхнього відновлення.

Хоча польова перевірка може виявитися достатньо складним завданням для обстеження потокової мережі водозборів, якщо його площа перевищує, наприклад 50 км², однак, часто потреба у такій інформації є незамінною і критично важливою для реалістичного моделювання майбутнього водозбірних процесів та забруднення з урахуванням штучних дренажів, а також вибору та пріоритизації низькопорядкових водозборів. Зокрема, ми оцінюємо високе значення запропонованого підходу із застосуванням техніки "випалювання", дистанційних та польових даних про низькоєрархічні антропогенно модифіковані водотоки, на тлі слабого інформаційного забезпечення даними про їхні водозбори.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – отримала подальший розвиток методика напівавтоматичного розмежування низькопорядкових водозборів з використанням інструменту QSWAT+ на підставі широкодоступних цифрових моделей рельєфу середньої роздільної здатності (30 м) з інтеграцією створеної за даними дешифрування супутникових знімків та польової перевірки мережі антропогенно модифікованих природних і штучно створених потоків і каналів, які мають зв'язок з головним руслом, що в комплексі розвиває концепцію цільового розмежування для пріоритизації та вибору таких водозборів як цілісних планувальних одиниць та об'єктів екосистемного відновлення.

Практична значущість результатів дослідження – запропоновану та перевірену методику застосовано для визначення меж трьох низькопорядкових водозборів в Івано-Франківській області, розташованих у різних ландшафтно-екологічних та геоморфологічних умовах, що може мати подальший вектор розвитку у створенні цільової мережі ділянок з відновлення екосистем в Україні загалом, з особливим акцентом на роль громад у цьому процесі, а також використовуватись як інструмент розмежування для вивчення потенційних екосистемно-гідрологічних ризиків в умовах антропогенного впливу на природні гідрогеоморфологічні та ландшафтні механізми їхнього виникнення та локалізації.

Висновки / Conclusions

Розроблено та випробувано методику напівавтоматичного розмежування низькопорядкових водозборів приміських та сільських територій за допомогою програмних інструментів QSWAT+ та Google Earth Pro на підставі DEM (30 м), з акцентом на польову перевірку

антропогенно модифікованих елементів потокової мережі in-situ для підвищення точності. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Охарактеризовано роль дослідження та практичного виконання розмежування антропогенно змінених водозборів невеликих потоків, струмків на рівні громад, як ефективних цільових планувальних одиниць у політиці відновлення природи.
 2. Виявлено, що у разі запуску процесу розмежування, з використанням shp-файлу та функції випалювання потокової мережі "Burn in existing stream network" на підставі широко доступних даних про гідромережу, існують істотні спотворення та помилки, пов'язані з поглинанням (захопленням) меж сусідніх водозборів, рівнинністю території та недостатньою роздільною здатністю DEM, а також антропогенним порушенням механізмів природного вільнопотокового виходу.
 3. Порівняльним випробуванням встановлено, що після коригування векторного шару потокової мережі за результатами детальних польових обстежень, збіжність окресленого водозбору з еталонним зросла за індексом Жаккара від 0,52 до 0,76, що підтверджує важливість перевірки антропогенно модифікованих та змінених елементів потокової мережі водозбору в польових умовах, особливо найвіддаленіших (периферійних).
 4. На прикладі окреслення водотоків Млинівка Стебницька, Черешенька (Івано-Франківський район) та Бересток (Коломийський район), встановлено, що напівавтоматизоване розмежування водозборів малих водотоків може деталізувати реалізацію водозбірної екосистемного принципу через визначення меж міководозборів, коли це потрібно для різноманітних наукових цілей, робить метод зручним на рівні навіть невеликих територіальних громад, що є ключовим у забезпеченні сталого управління водними та земельними ресурсами.
- Подальші наукові дослідження в Україні мають бути спрямовані на удосконалення інтегрованих ГІС-інструментів, що дадуть змогу не лише окреслювати низькопорядкові водозбори, а й оцінювати їх екологічний стан, рівень антропогенного навантаження та потенціал для запуску природних механізмів екосистемної реставрації.

References

1. Barrios Avalos, J. J., & Franquesa Sánchez, J. (2024). Hydrological and urban analysis of territories under high water stress: Nazas and Aguanaval rivers, Mexico. *Land*, 13(7), article ID 1074. <https://doi.org/10.3390/land13071074>
2. Bhattacharjee, J., Marttila, H., Molina Navarro, E., & Kløve, B. (2024). Application of SWAT to assess peatland forestry impacts on water quality. *Hydrology Research*, 55(11), 1091–1109. <https://doi.org/10.2166/nh.2024.049>
3. Bose, A. C., Sridhar, P., Giridhar, M. V. S. S., & Viswanadh, G. K. (2014). Watershed delineation and stream network analysis using GIS. *International Journal of Watershed Engineering*, 1(1), 1–13. URL: <https://www.researchgate.net/publication/232273788>
4. David, S. R., Murphy, B. P., Czuba, J. A., Ahammad, M., & Belmont, P. (2023). USUAL Watershed Tools: A new geospatial toolkit for hydro-geomorphic delineation. *Environmental Modelling & Software*, 159, article ID 105576. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105576>
5. European Commission. (2022). Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on nature restoration. COM (2022) 304 final. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022PC0304>
6. Haag, S., & Shokoufandeh, A. (2019). Development of a data model to facilitate rapid watershed delineation. *Environmental Modelling & Software*, 122, article ID 103973. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.009>
7. Haubrock, P. J., Stubbington, R., Fohrer, N., Hollert, H., Jähnig, S. C., Merz, B., & Haase, P. (2025). A Holistic Catchment-Scale Framework to Guide Flood and Drought Mitigation Towards Improved Biodiversity Conservation and Human Wellbeing. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 12(1), article ID e70001. <https://doi.org/10.1002/wat2.70001>
8. Iryna, O., Natalia, N., Krzysztof, B., & Stephen, M. (2025). Geoinformation modelling of the watershed area of small and medium-sized rivers for environmental audit. *Reports on Geodesy*, 119, 23–29. <https://doi.org/10.2478/rgg-2025-0004>
9. Jarihani, A. A., Callow, J. N., McVicar, T. R., Van Niel, T. G., & Larsen, J. R. (2015). Satellite-derived Digital Elevation Model (DEM) selection, preparation and correction for hydrodynamic modelling in large, low-gradient and data-sparse catchments. *Journal of Hydrology*, 524, 489–506. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.049>
10. Kumar, V., Sen, S., & Chauhan, P. (2021). Geo-morphometric prioritization of Aglar micro watershed in Lesser Himalaya using GIS approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(2), 1269–1279. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01000-8>
11. Mykytsei, M. T. (2024). Conceptual basis for the search and eco-diagnostics of risk zones in watersheds. *Man and Environment. Issues of Neocology*, 42, 51–69. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-04>
12. Omran, A., Dietrich, S., Abouelmagd, A., & Michael, M. (2016). New ArcGIS tools developed for stream network extraction and basin delineations using Python and java script. *Computers & Geosciences*, 94, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.06.012>
13. Partheeban, P., & Priyanka, M. (2024, December). Comparative Analysis of Manual and GIS-Based Watershed Delineation Techniques Using DEMs. In: *IEEE 2024 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/icscan62807.2024.10894014>
14. Pricope, N. (2020). Evaluating SWAT Model Performance for Runoff, Percolation, and Sediment Loss Estimation in Low-Gradient Watersheds of the Atlantic Coastal Plain. *Hydrology*, 7(2), article ID 21. <https://doi.org/10.3390/hydrology7020021>
15. Rocha, J., Duarte, A., Silva, M., Fabres, S., Vasques, J., Revilla-Romero, B., & Quintela, A. (2020). The importance of high resolution digital elevation models for improved hydrological simulations of a mediterranean forested catchment. *Remote Sensing*, 12(20), article ID 3287. <https://doi.org/10.3390/rs12203287>
16. Shukla, R., Rudra, R., Daggupati, P., Little, C., Khan, A., Goel, P., & Prasher, S. (2024). Evaluation of BMPs in Flatland Watershed with Pumped Outlet. *Hydrology*, 11(2), article ID 22. <https://doi.org/10.3390/hydrology11020022>
17. Si, Q., Brito, H. C., Alves, P. B., Pavao-Zuckerman, M. A., Rufino, I. A., & Hendricks, M. D. (2024). GIS-based spatial approaches to refining urban catchment delineation that integrate stormwater network infrastructure. *Discover Water*, 4(1), article ID 24. <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00083-z>
18. Śliwiński, D., Konieczna, A., & Roman, K. (2022). Geostatistical resampling of LiDAR-derived DEM in wide resolution range for modelling in SWAT: A case study of Zgłowiączka River (Poland). *Remote Sensing*, 14(5), article ID 1281. <https://doi.org/10.3390/rs14051281>
19. Solanki, Harish Kumar. (2024). Watershed Prioritisation, Village Watershed Geographical Relationships and its Implications on Watershed Works. *Journal of Global Resources*, 10(02). <https://doi.org/10.46587/JGR.2024.v10i02.004>
20. Thomas, I. A., Jordan, P., Shine, O., Fenton, O., Mellander, P. E., Dunlop, P., & Murphy, P. N. (2017). Defining optimal DEM resolutions and point densities for modelling hydrologically sensitive areas in agricultural catchments dominated by microtopography. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 54, 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.08.012>
21. Tigabu, T. B., Visser, A., Kadir, T., Abudu, S., Cameron-Smith, P., & Dahlke, H. E. (2024). Optimization of the SWAT+ model to

- adequately predict different segments of a managed streamflow hydrograph. *Hydrological Sciences Journal*, 69(9), 1198–1217. <https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2364714>
22. Yang, P., Ames, D. P., Fonseca, A., Anderson, D., Shrestha, R., Glenn, N. F., & Cao, Y. (2014). What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results?. *Environmental modelling & software*, 58, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.04.005>
23. Yatsyshyn, T., Kundelska, T., Mykytsei, M., & Hrytsuliak, H. (2024). Report Comprehensive Ecological Assessment of the Mlynivka River, Radchanka River, 380 p. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.15258123>

M. T. Mykytsei, Ya. O. Adamenko

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

SEMI-AUTOMATIC DELINEATION OF LOW-ORDER CATCHMENTS AS NATURE RESTORATION OBJECTS UNDER ANTHROPOGENIC CHANGES

A method of semi-automatic delineation of low-order catchments is proposed and tested, which can be useful in identifying areas for nature restoration at the community level. The method makes it possible to delineate catchments of the lowest hierarchical levels, starting with small streams that are subject to anthropogenic impacts, including agricultural activities and engineered hydrogeomorphic changes. The study successfully integrated natural and artificial watercourses, including roadside and reclamation channels, channelized sections of streams, and ephemeral streams, into a 30-meter resolution digital elevation model (DEM) based on QSWAT+ models. To improve the accuracy of the delineation, we used reference vector layers of the stream network created by interpreting high-resolution images in Google Earth Pro and field verification of the most distant elements and their connection to the main channel. The delineation procedure with the activation of the "Burn in existing stream network" tool was tested in three low-order catchments: the Mlynivka Stebnytsia River (right tributary of the Bystrytsia Solotvynska River) and the Chereshenka River (left tributary of the Bystrytsia Solotvynska River), whose catchments are located in the suburban area of Ivano-Frankivsk, and the Berestok River, a right tributary of the Dniester River within the Horodenka urban territorial community, which forms runoff in the agricultural landscape on the sloping lands of the surrounding villages. The results show that complex DEM processing using built-in filters, smoothing and depression filling functions in QGIS and SAGA GIS, as well as repeated B-spline interpolation on complex or distorted areas, contribute to the effective integration of natural and artificial stream networks into the prepared medium-resolution DEM in QSWAT+. This ensures fast and reliable delineation of catchment boundaries, despite the existing anthropogenic hydrogeomorphic changes and artificial flow redistribution. The effectiveness of the method, which is realized through the demonstrated algorithm, confirms the possibility of implementing the concept of targeted delineation of low-order catchments as integral objects of nature restoration. This can become an important practical tool for implementing ecosystem restoration policies at the level of territorial communities in Ukraine, which is consistent with the objectives of the EU Nature Restoration Regulation. Using a catchment approach with a focus on small watercourses and their catchments can provide a comprehensive and practical method for identifying and restoring the most vulnerable and sensitive ecosystems. By identifying and restoring low-order catchments to their natural state in communities, we hope to further enhance natural regeneration processes, stabilize and maintain favourable chemical, biological, and climatic conditions, maintain hydrological balance, and strengthen ecosystem connectivity and biodiversity at the regional and national levels.

Keywords: catchment delineation; digital elevation model; field data collection; drainage network channels; natural and artificial streams.