

Михайло ПРОЦИК^{1a}, Борис ЧЕТВЕРІКОВ^{1a}, Олександр ДОРОЖИНСЬКИЙ^{1b},
Андрій ІВАНЕВИЧ^{1b}

¹ Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна, +38 (063) 1671585, e-mail: chetverikov@email.ua., ^{1a} <http://orcid.org/0000-0001-8677-1735>.

^{1b} <http://orcid.org/0000-0002-3476-9948>

<https://doi.org/10.23939/istecgcap2021.93.072>

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИДІЛЕННЯ ВОДОЗБІРНИХ БАСЕЙНІВ ЗА ЦИФРОВИМИ МОДЕЛЯМИ РЕЛЬЄФУ (НА ПРИКЛАДІ СКОЛІВСЬКОГО РАЙОНУ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

Мета. Вдосконалити методику автоматизованого виділення водозбірних басейнів та отримання гідрологічних і морфометричних характеристик на базі цифрових моделей рельєфу. Методика і результати роботи. Необхідною умовою коректного визначення пониження рельєфу місцевості є наявність точок істинного потоку на краю розрахункової області (якщо річка впадає в озеро, то воно не повинне входити в розрахункову територію цілком, в іншому випадку будуть отримані невірні результати). За допомогою виконання операції визначення пониження рельєфу місцевості створюється нова ЦМР, яка не містить фіктивних понижень рельєфу. На наступному кроці вона використовується в якості вхідних даних для розрахунку напрямку потоку за алгоритмом D8. За запропонованою технологічною схемою необхідно опрацювати покровою такі шість блоків: заповнення замкнутих депресій, розрахунок напрямку стоку, розрахунок сумарного стоку, створення точкового векторного набору даних замикаючих створів (точок гирла), створення границь водозбірних басейнів, растрово-векторне перетворення даних. У результаті експериментальних та теоретичних досліджень апробовано методику автоматизованого виділення водозбірних басейнів, а саме визначення гідрологічних та морфометричних параметрів рельєфу. Проведено ранжування басейнів за цими параметрами відповідно до існуючих класифікацій, складена серія відповідних тематичних електронних карт. Необхідно сказати, що в Сколівському районі Львівської області розташовано 590 водозбірних басейнів, а їхня площа становить 1407 км². Водозбірні басейни класифіковані за висотою, а саме: низько-гірських басейнів в регіоні 6 шт., площа їх становить 7 км², середньо-гірських – 360 шт., площа 755 км², високо-гірських – 224 шт., площа 645 км². Класифіковано басейни за середнім ухилом: перша категорія – це дуже пологі схили (0–3 градуси) – 27 басейнів, площа 7 км²; друга категорія – це покаті схили (9–12 градусів), 128 басейнів, площа 303 км²; третя категорія – це круті схили (12–15 градусів і більше), 225 басейнів, площа 648 км². Проведено оцінку точності між опорною та вихідною моделями рельєфу. Отримано для ухилів СКВ = 0,63 (м), для висоти – СКВ = 5,43 (м).

Наукова новизна і практична значущість. Запропоновано технологічну схему автоматизованого виділення водозбірних басейнів за цифровими моделями рельєфу на прикладі Сколівського району Львівської області та опрацьовано методику виділення водозбірних басейнів. За опрацьованою методикою побудовані карти водотоків різних порядків та їхніх водозбірних басейнів і виконано класифікацію басейнів за площею на територію Сколівського адміністративного району. Ці результати можуть бути використані місцевими організаціями для моніторингу водних ресурсів.

Ключові слова: водозбірні басейни, ЦМР, SRTM, морфометричні характеристики, гідрологічні характеристики.

Вступ

Характерною тенденцією сьогодні є стрімке розширення можливостей оперативної актуалізації бази даних, а також зростання обсягу відкритої просторової інформації. У вільному доступі знаходяться базові просторові дані (проекти Open Street Map, VMap0, VMap1), космічні знімки з роздільною здатністю 10–30 м (LANDSAT, SENTINEL), цифрові моделі рельєфу (SRTM, ASTER GDEM), низка джерел тематичних даних. Все це створює прекрасні умови для освоєння ГІС-технологій фахівцями різних профілів, які працюють із просторовими даними.

Інформація про кількісні характеристики рельєфу, виражені через його морфометрію, є необхідною умовою для вирішення широкого кола наукових і прикладних завдань. Найчастіше характеристики рельєфу залучають для моніторингу екзогенних природних небезпек. Їх використовують для ландшафтного аналізу території та її районування, при пошуках родовищ корисних копалин, при оцінці геоecологічного стану територій. З появою глобальних цифрових моделей рельєфу, створених за даними дистанційного зондування землі з космосу, в основі яких лежать регулярні координатні сітки, принципово

змінився вектор географічних досліджень, що дало новий якісний поштовх для кількісного аналізу різних параметрів територій землі.

Водозбірний басейн – це площа на земній поверхні, в яку стікають поверхневі чи підземні води, що впливає на екологічні зміни. Екологічні характерні зміни можна досліджувати за допомогою методики автоматизованого визначення гідрологічних та морфометричних характеристик за цифровою моделлю рельєфу (SRTM), з використанням відповідного програмного забезпечення. Отже, визначення характеристик водозбірних басейнів може бути здійснене за допомогою радарної зйомки SRTM.

Водозбірний басейн кожного водосховища включає поверхневі та підземні води. Поверхневий водозбірний басейн – це ділянка або площа земної поверхні, з якої вода на земній поверхні потрапляє в окрему річкову систему або потрапляє в річку. Водозбір підземних вод утворює пухкий шар відкладень, з якого вода надходить у річкову мережу. За звичайних обставин поверхневі басейни та басейни підземних вод не перекриваються, тому визначити межі басейнів підземних вод дуже важко. Тому розмір басейну можна розглядати лише як поверхневий водозбірний басейн. Водозбірні басейни між собою відрізняються за гідрологічними і морфометричними характеристиками, до яких належать положення водотоків, площа елементарних басейнів і вододілів, кут нахилу, розмежування територій.

Традиційним джерелом даних для розрахунків цих параметрів є карти і результати землемірної зйомки. Але є й альтернативний спосіб отримання гідрологічних та морфометричних характеристик водозбірних басейнів, який заснований на цифрових моделях рельєфу. Якщо цей процес автоматизувати, то це істотно знизить часові витрати на отримання необхідних параметрів.

Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) в даний час широко використовуються фахівцями, які працюють в самих різних напрямках географії та геоморфології. Однією з найважливіших завдань, що вирішуються за допомогою ЦМР, є автоматизоване виділення кордонів водозбірних басейнів, а також визначення їх основних географічних характеристик. Висока значимість цих процедур обумовлена різноманітністю фундаментальних і прикладних проблем, при вирі-

шенні яких застосовується басейновий підхід, роль якого в даний час тільки зростає. Причинами цього є можливості використання сучасних інформаційних технологій, доступність цифрових моделей поверхні Землі і відомостей про базові гідрометеорологічні параметри для всієї території планети. Все це дозволяє досліджувати з використанням ГІС природні процеси і явища на різних рівнях генерації.

Прикладними питаннями виділення водозбірних басейнів за допомогою ГІС-технологій займається значна кількість як вітчизняних, так і закордонних вчених.

Так, наприклад, у статті [Мальцев, Ермолаєв, 2014] представлено та запропоновано комплексний підхід для оцінки коефіцієнтів подачі осаду. Метод включає морфометричний аналіз водозбірних басейнів, математичне моделювання та застосування радарного моніторингу. Ефективність підходу демонструється аналізом схилів басейну р. Локна. Збираються морфометричні дані, обчислюється коефіцієнт LS для оброблених гірських схилів і визначається значення потенційного відкладення осаду з підгірних схилів у долині річки в умовах безпалого і типового врожаю. Морфометричне картографування схилів водозбірних басейнів дозволило визначити площі з високим і дуже високим ерозійним потенціалом. Застосування радарного моніторингу дозволило підтвердити ефективність методу та сформулювати деякі шляхи вдосконалення підходу.

В статті [Ермолаєв та ін., 2012] розглянуті загальнотеоретичні і методичні питання створення та використання глобальної геоінформаційної системи, що відображає основні закономірності формування та просторово-часової мінливості стоку зважених наносів річок Землі. Показана роль річкового басейну як геосистемного підходу до вивчення стоку наносів. Запропоновано і апробовано підходи до автоматизованого виділення кордонів річкових басейнів, методи інтеграції геоінформаційної системи і тематичних баз даних для цілей геоморфологічного аналізу стоку зважених наносів річок.

У дослідженні [Kinnell, 2005] представлено та запропоновано метод обчислення коефіцієнта довжини нахилу, який не відповідає іншим критеріям. Показано, що альтернативні підходи, які враховують внесок ділянки піднімання у визначення коефіцієнта довжини схилу, коли

коефіцієнт стоку вгору змінюється від рівня комірки, відповідають обом критеріям.

В статті [Lindsay, 2014] представлено інструменти геопросторового аналізу GIS Whitebox з відкритим кодом, висвітлено деякі його можливості та цілі проектування. Висвітлено, як цей інструментарій застосовується для виділення об'єктів гідрографії.

У дослідженні [Maltsev, et al., 2015] представлено відображення врожаїв річкових відкладень у континентальному чи глобальному масштабах, і вказано на низку технічних труднощів, які значною мірою були ігноровані. Карти повинні показувати великі зональні особливості врожаю річкових відкладень, а також рівень (згладжених) локальних аномалій.

У дослідженні [Maltsev, et al., 2012] представлено потенційне використання ГІС та пов'язаної з нею бази даних для картографування та аналізу глобальних моделей виходу осаду.

В статті [O'Callaghan & Mark, 1984] представлено витяг дренажних мереж з цифрових даних висот, важливий для кількісних досліджень в геоморфології та гідрології. Представлений метод вилучення дренажних мереж із сітчастих даних висот. Метод обробляє штучні ями, введені системами збору даних, і витягує лише основні канали дренажу.

В публікації [González-Díez, 2000] представлено планування землекористування. Воно вимагає розгляду різноманітної альтернативи в землекористуванні, що передбачає різні просторові розподіли для оцінки їх ефективності з погляду використання ресурсів та екологічних наслідків. Оцінка впливу на навколишнє середовище може допомогти визначити найбільш доцільні альтернативи на ранньому етапі планування.

В статті [Damoiseaux, 2000] наведені цифрові супутникові знімки, які забезпечують важливі якісні дані для відображення, інвентаризації, моніторингу та опису об'єктів місцевості. В статті акцентується увага на використанні зображення з різних супутникових давачів для топографічного картографування, моделювання місцевості та оцінки точності результатів аналізу різних наборів даних.

У науковому дослідженні [Arthur N. Strahler, 1957] представлені кількісні геоморфологічні методи, розроблені протягом останніх кількох років, які забезпечують засоби вимірювання розмірів і властивостей форми водозбірних

басейнів. Двома загальними класами описових чисел є по-перше, лінійні вимірювання в масштабі, за допомогою яких геометрично аналогічні одиниці топографії можна порівняти за розміром; і по-друге безрозмірні числа, зазвичай кути або співвідношення мір довжини, за допомогою яких форми аналогічних одиниць можна порівнювати незалежно від масштабу. Лінійні вимірювання масштабу включають довжину каналів потоку заданого порядку, дренажну щільність, константу обслуговування каналу, периметр басейну. Безрозмірні властивості можуть бути пов'язані з гідрологічними даними та даними про вихід осадів, які вказані як маси або обсяги норми потокової одиниці, незалежно від загальної площі водозбору.

В статті [Bors, 2001] представлено побудову моделі рельєфу, що забезпечує виділення ієрархічних одиниць його поверхні. Відмінності за природними екологічними властивостями і поенційними геофізичними характеристиками дають змогу порівняти потенційні та реальні (в термодинамічних умовах конкретних морфологічних систем) геофізичні поля. Така дискретизація дозволяє будувати векторні поля градієнтів геофізичних полів геосистем, виявляти параметри порядку самоорганізації геосистем і досліджувати закономірності складання їхньої вертикальної і горизонтальної структури.

Система вертикальної ієрархії об'єктів рельєфу з належними їм параметричними описами відповідає такому ряду просторових одиниць: морфологічна структура (ієрархія тектонічних блоків, вузлів) – морфокліматичний район (тип екзогенного рельєфу) – ієрархія об'єктів поверхні рельєфу. Виділення ієрархії об'єктів класу тектонічних структур, які контролюють формування сучасного рельєфу на рівні морфологічних структур, проводиться за методикою морфоструктурного районування (МСР) (С. Я. Ранцман і М. П. Гласко), ієрархії об'єктів.

Також, геоморфологічні процеси були досліджені в роботах [Bussettini, et al., 2014; Fuller, et al., 2013; González del Tánago, et al., 2015; Meitzen, et al., 2013, Rinaldi, et al., 2013].

Всі проаналізовані літературні джерела безумовно є науковими працями високого рівня і питання, що в них розглядаються дуже важливі. Однак, досить мало наукових робіт спрямовано власне на автоматизацію тих чи інших процесів у вирішенні прикладних завдань, у зв'язку з чим підкреслюється особлива актуальність нашої тематики.

Мета

Мета роботи полягає у вдосконаленні методики автоматизованого виділення водозбірних басейнів та отримання їхніх гідрологічних та морфометричних характеристик на базі цифрових моделей рельєфу.

Методика та результати роботи

Автоматизоване визначення гідрологічних і морфометричних параметрів водозбірного басейну за цифровою моделлю рельєфу SRTM

За допомогою інструментів Spatial Analyst в ArcGIS, групи «гідрологія» можна визначити порядок водотоків і довжини ліній потоку. Першою операцією, необхідною для розрахунку водозбірного поділу території по ЦМР, є заповнення пониження рельєфу місцевості. Фіктивні (які не існують у природі) пониження генеруються усіма стандартними алгоритмами створення ЦМР, а також завжди є в моделях рельєфу, отриманих за даними дистанційного зондування.

Необхідною умовою коректного заповнення пониження рельєфу місцевості є наявність точок істинного потоку на краю розрахункової області (якщо річка впадає в озеро, то воно не повинне входити в розрахункову територію цілком, в іншому разі будуть отримані невірні результати). За допомогою виконання операції заповнення пониження рельєфу місцевості створюється нова ЦМР, яка не містить фіктивних понижень рельєфу та використовується на наступному кроці в якості вхідних даних для розрахунку напрямку потоку за алгоритмом D8.

На рис. 1 подано блок-схему виділення водозборів по ЦМР.

Розрахунок напрямку стоку

Цей метод заснований на припущенні, що потік, який формується в будь-якій комірці, повністю спрямований в одну з восьми сусідніх комірок (яка має найменшу висоту). В якості вхідного растру для розрахунку напрямку потоку використовується ЦМР із заповненими локальними пониженнями. Вектор потоку визначається напрямом найкрутішого спуску або максимального зниження. Якщо максимальне зниження висоти до найближчих осередків однаково в декількох напрямках, то область сусідства розширюється до тих пір, поки не буде знайдений найкрутіший спуск. Якщо знайдено напрямок найкрутішого зниження, вихідній комірці дається значення, що представляє цей напрямок. Вхідними даними інструменту напрямку потоку є цілочисельний растр, значення якого знаходяться в діапазоні від 1 до 128. По суті, цей растр є експозицією схилу, класифікованої за вісьмома румбами. Їхні значення в растрі кодовані так: 1 – Схід, 2 – Південний Схід, 4 – Південь, 8 – Південний Захід, 16 – Захід, 32 – Північний Захід, 64 – Північ, 128 – Північний Схід (рис. 2). Растр напрямку потоку використовується на наступному етапі для розрахунку акумуляції площі стоку (Flow Accumulation). В якості додаткових вхідних даних може бути створений растр зниження, який характеризує відношення максимальної зміни висоти для кожної комірки вздовж напрямку потоку до відстані між центрами комірок.

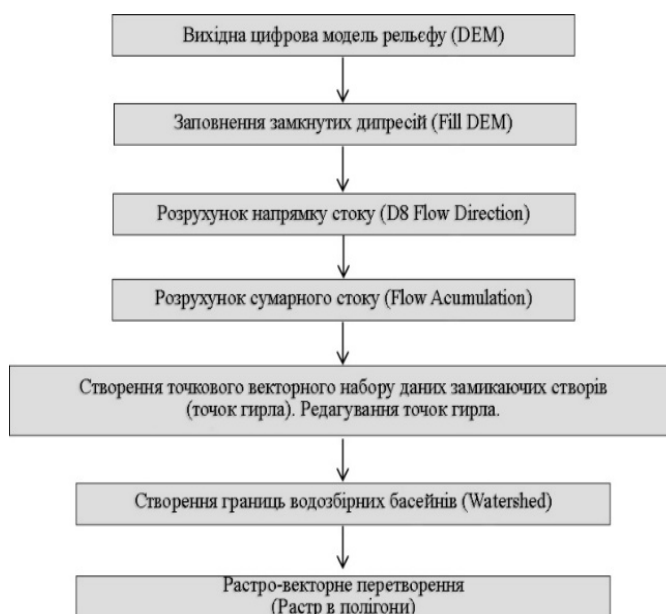


Рис. 1. Блок-схема виділення водозборів по цифровій моделі рельєфу в ArcGIS

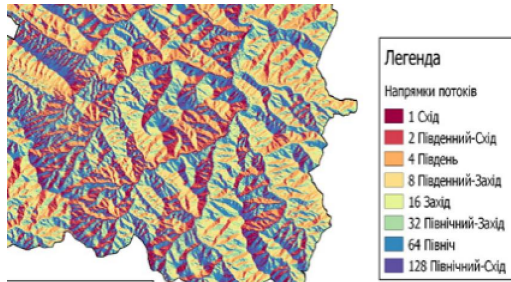


Рис. 2. Результат розрахунку напрямку потоку

Розрахунок сумарного стоку

Функція дозволяє розрахувати площу для кожного осередку пікселя вхідного растру сумарного потоку та відображає ту кількість осередків, якими переміщається умовний водний потік до цього осередку (площа водозбору для кожного осередку).

Величини у вхідному растрі, що відображають значне потокове накопичення, можуть бути використані для ідентифікації водотоків. Своєю чергою, осередки зі сумарним стоком, рівним нулю, можуть бути використані для виділення хребтів або ліній вододілу. В результаті контрастування растру краще видно лінії водотоків, що відповідають високим значенням в осередках сумарного потоку.

Розрахований за ЦМР растр є джерелом для створення растрової моделі мережі водотоків (дренажу), а саме поняття растрової мережі водотоків означає деяку зв'язну сукупність осередків тальвегів.

Від вибору критичного значення водозбірної площі залежить ступінь генералізації растрової мережі водотоків. Отримати з растру осередки, які стосуються водотоків, можна декількома способами: за допомогою інструментів умови (Con) і встановити Нуль (Set Null), (Arc Toolbox, група Spatial Analyst), або за допомогою растрового калькулятора матеріалів (група інструментів Spatial Analyst, підгрупа алгебра карт). Результати, отримані цими засобами, дозволяють встановити Нуль (Set Null) для вилучення мережі водотоків.

За результатами використання цього інструменту виділяються всі водотоки, в яких значення акумуляції стоку більше 2000 (рис. 3).

У наступному етапі – виділення водозбірних басейнів, – виконується створення і редагування векторних або растрових даних у точках гирла (замикаючих створах). Найпростіше встановлювати замикаючі створи вручну, як точкові векторні об'єкти, а саме при створенні векторного набору даних точок гирл необхідно враховувати,

що його система координат повинна бути такою ж, як у використовуваної ЦМР. Замикаючий створ може бути встановлений в будь-якому осередку растру сумарного стоку. Завдяки цьому можна виділити водозбірний басейн довільних розмірів (водозбір до будь-якого останнього у створі гідропоста). Точки гирл редагують так, щоб вони знаходилися точно на осі розрахункових водотоків (дренажу).

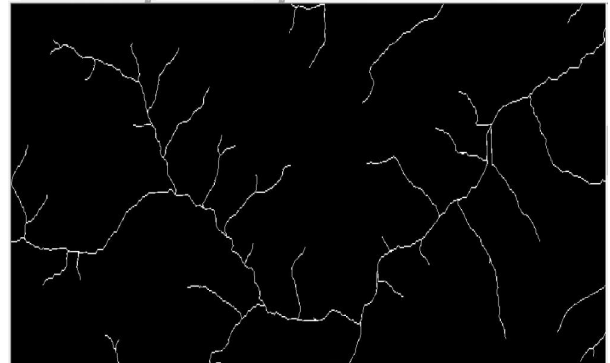


Рис. 3. Водотоки, отримані по растру акумуляції стоку

Потрібно звертати увагу на різні бічні притоки і не ставити точки в місцях їх гирла (оскільки в такому випадку буде виділено водозбір не цілої річки, а її притоки). В інструментарії ArcGIS можна одночасно виділити безліч водозборів. Необхідною умовою для цього є вказання замикаючих створів для всіх виділених водозборів. Виділені водозбори не повинні входити один в інший як складові частини, тому потрібно враховувати порядок водотоків. Визначити порядок водотоків можна за допомогою інструменту Stream Order в групі «гідрологія» модуля Spatial Analyst.

Метод порядку водотоків передбачає присвоєння порядкового номера зв'язків у мережі водотоків на основі кількості їхніх приток. Інструмент порядку водотоків дозволяє використати два методи обчислення. Найчастіше використовують метод Стралера. В цьому методі всім сегментам водотоків, що не мають приток, присвоюється перший порядок. Порядок зростає тільки в тому разі, якщо зливаються водотоки з однаковим порядком. Отже, після злиття сегментів першого і другого порядку, результуючий водотік буде водотоком другого порядку, а злиття двох водотоків різних порядків не призведе до його зростання (рис. 4).

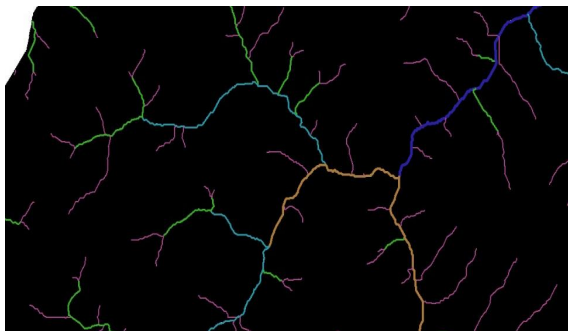


Рис. 4. Метод визначення порядку водотоків за Стралером

У використанні методу Шреве порядки водотоків є адитивними. Наприклад, при перетині двох зв'язків першого порядку створюється зв'язок другого порядку, при перетині зв'язку першого і другого порядку буде створений зв'язок третього порядку, а при перетині зв'язку другого і третього порядку створюється зв'язок четвертого порядку.

Для отримання векторних ліній водотоків використовується інструмент Stream to Feature. Після запуску інструменту в таблицю змісту додаються векторні лінії водотоків. На рис. 5 відображені водотоки відповідно до їх порядку від 1 до 5.

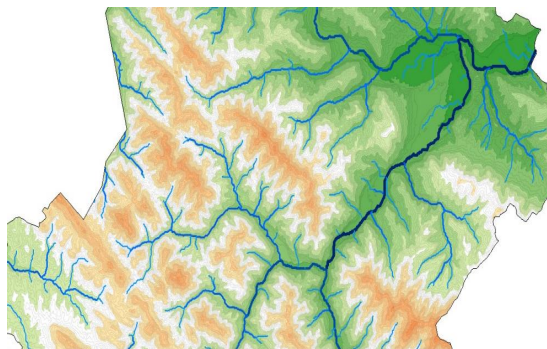


Рис. 5. Класифіковані векторні лінії водотоків

Виділення і поділ гирлових точок

Водозбірний басейн у робочому процесі гідрологічного аналізу ЦМР будується для однієї точки. Якщо в якості точки вибрати гирло річки, то отриманий басейн буде відповідати басейну всієї річки. Однак якщо гирло є точкою злиття двох водотоків, буде побудований басейн, загальний для обох водотоків. Проблема можна вирішити, трохи зсунувши кінцеві точки водотоків вище за течією.

Для побудови навколо точок невеликих буферних зон радіусом в $2R$, де R – розмір комірки

растру ЦМР (роздільна здатність ЦМР), запускається інструмент Buffer, який відповідає за побудову буферних зон і задається параметр радіусу в $2R$ (200 м) (рис. 6). Отриманими буферними зонами обрізаємо вихідні лінії водотоків, таким чином скоротивши їх (рис. 7).

Скориставшись знову інструментом Feature Vertices to Points, побудовано кінцеві точки для обрізаних водотоків річок, які не збігаються для кожної пари суміщення приток (рис. 8). Наведена послідовність дій є класичним прикладом інтерпретації завдання в термінах інструментів ГІС-аналізу.



Рис. 6. Буферні зони радіусом 200 м в кінцевих точках витоків річок

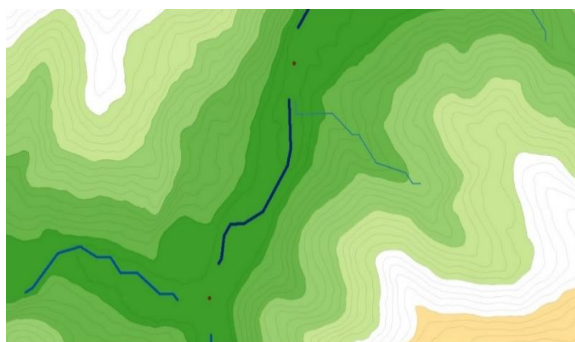


Рис. 7. Результат обрізки витоків річок по буферній зоні

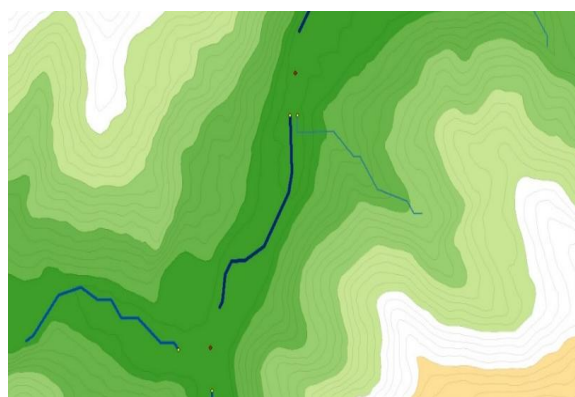


Рис. 8. Точки злиття, зміщені вище за течією

Побудова водозбірних басейнів

Побудова водозбірних басейнів складається з трьох операцій: прив'язка точок гирла до растру акумуляції стоку, проведення кордонів водозборів в растровому режимі, векторизація басейнів. Вказується радіус пошуку, в межах якого навколо кожної заданої точки гирла буде знаходитись комірка з максимальною акумуляцією стоку. В цьому випадку він дорівнював 100 метрам – розширенню ЦМР.

Для побудови кордонів водозбірних басейнів створюється растрове зображення з унікальним кольоровим забарвленням, щоб інтерпретувалися кордони басейнів (рис. 9).

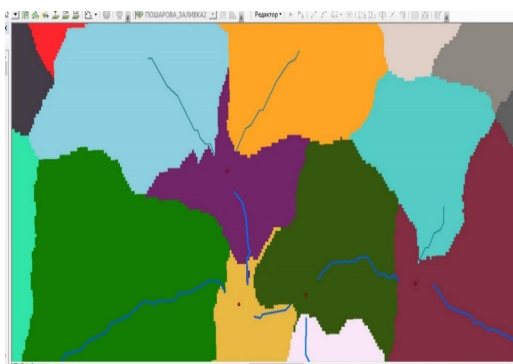


Рис. 9. Растровий шар водозбірних басейнів

Отримані басейни конвертовано у векторні полігони. Результат конвертації наведено на рис. 10.

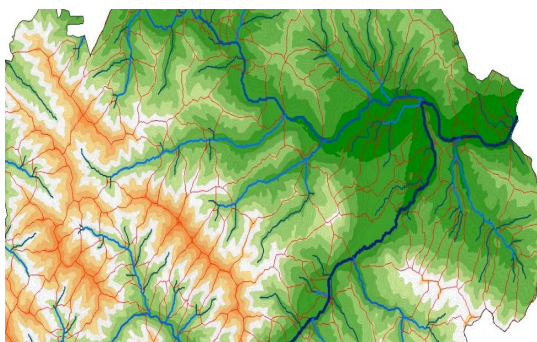


Рис. 10. Векторний шар водозбірних басейнів

Отримання статистичних даних водозбірних басейнів

У межах кордонів водозбірних басейнів можливо розрахувати статистику за даними ЦМР. Розраховано статистику за висотами та ухилом. Далі цю статистику приєднано до вихідного шару басейнів (рис. 11).

Після отримання таблиці статистичних даних їх потрібно приєднати до вихідного шару за ключовим полем ID.

OBJECTID*	ID	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM
1	1	1	10000	220.3973	220.3973	0	220.3973	0	220.3973
2	2	1	10000	222.6155	222.6155	0	222.6155	0	222.6155
3	3	1	10000	241.1273	241.1273	0	241.1273	0	241.1273
4	4	850	8500000	145.4833	222.8799	77.39661	184.5493	23.09977	156866.9
5	5	1	10000	260.4547	260.4547	0	260.4547	0	260.4547
6	6	1	10000	244.5152	244.5152	0	244.5152	0	244.5152
7	7	2198	21980000	195.7846	261.7631	65.97845	240.3712	14.64094	528335.9
8	8	1	10000	241.6034	241.6034	0	241.6034	0	241.6034
9	9	2	20000	142.9754	150.9643	7.988922	146.9699	3.994461	293.9398
10	10	4	40000	160.6833	188.5732	27.88995	174.1799	9.957454	696.7195
11	11	1	10000	195.6826	195.6826	0	195.6826	0	195.6826
12	12	2164	21640000	124.9571	220.0333	95.07621	192.3888	17.46154	416328.9
13	13	5754	57540000	140.0826	223.0824	82.99973	184.8574	19.06441	1063669
14	14	2193	21930000	187.991	261.956	73.96495	238.3093	13.8947	522612.3
15	15	3	30000	188.2518	198.1561	9.904282	192.2885	4.254304	576.8055
16	16	4948	49480000	174.5771	260.5574	85.98032	220.4731	15.47697	1090901
17	17	4583	45830000	201.0031	244.6497	43.64661	229.2884	9.123389	1050737
18	18	9800	98000000	149.3031	261.1561	111.8531	212.5401	22.67742	2082893
19	19	3784	37840000	160.5399	252.5933	92.05331	229.2196	18.16886	867367.1
20	20	2208	22080000	187.3759	261.8065	74.4306	234.981	13.9175	518838.1

Рис. 11. Таблиця статистики по водозбірних басейнах

Також розраховано площу водозбірних басейнів. Для цього в шарі водозбірних басейнів відкрито таблицю атрибутів та створено нове поле (shape_area_km2), в якому вираховано площу, використовуючи контекстне меню поля (рис. 12).

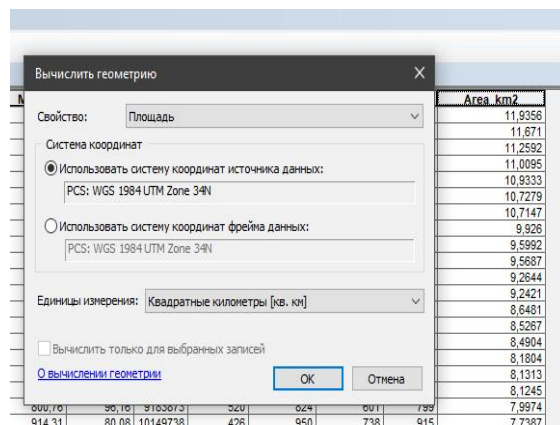


Рис. 12. Розрахунок площі водозбірних басейнів

Розрахунок, прив'язка і візуалізація статистики по водозбірних басейнах

На території Сколівського району Львівської області виділено 590 басейнових геосистем, що включають як басейни малих річок, так і їхні притоки. Проведено аналіз основних морфометричних показників рельєфу басейнів адміністративного району. Спочатку були розраховані основні статистичні показники (мінімум, максимум, середнє, середньо-квадратичне відхилення (СКВ)), побудовані гістограми частот (рис. 13, 14). Також проведено ранжування показників відповідно до існуючих класифікацій або експертно за відсутності таких. Відповідно до класифікацій побудовані відповідні тематичні карти за кожним показником.

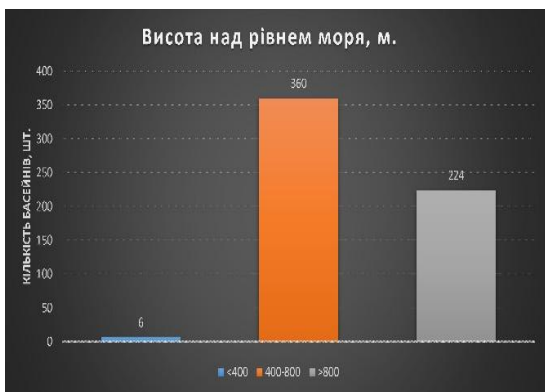


Рис. 13. Розподіл басейнів по висоті



Рис. 14. Розподіл басейнів за середнім ухилом

Таблиця 1

Класифікація басейнів за висотою

Середня висота, м	Форма рельєфу	Кількість басейнів, шт.	Частка від загальної кількості, %	Площа, км ²	Частка від загальної площі, %
<400	Низько-гірська	6	1,02	6,76	0,48
400–800	Середньо-гірська	360	61,02	755,55	53,69
>800	Високо-гірська	224	37,96	645,01	45,83
Разом		590	100	1407,32	100

Таблиця 2

Класифікація басейнів по середньому ухилу

Середній ухил, градуси	Форма рельєфу	Кількість басейнів, шт.	Частка від загального кількості, %	Площа, км ²	Частка від загальної площі, %
<3	Дуже пологі схили	27	4,58	7,11	0,61
3–6	Пологі схили	29	4,92	16,88	1,35
3–9	Слабо покаті схили	59	10,00	100,61	7,25
9–12	Покаті схили	128	21,69	302,54	21,69
12–15	Сильно покаті схили	125	21,19	313,99	22,48
15>	Круті схили	222	37,62	648,16	46,62
Разом		590	100	1407,32	100

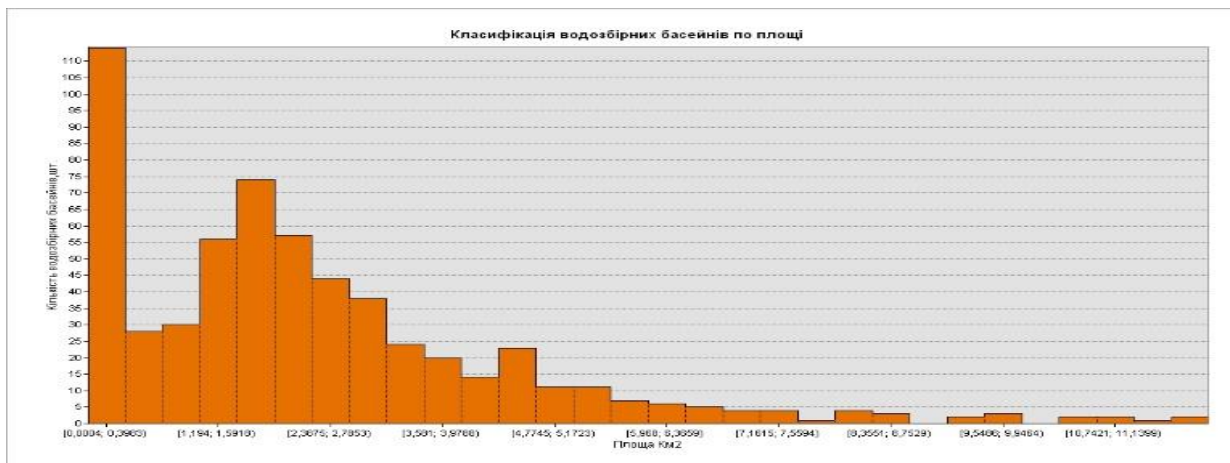


Рис. 15. Розподіл басейнів за середньою площею

Середня висота (рис. 16). При ранжируванні басейнів по середній висоті (табл. 1, 2) виконано стандартну класифікацію рельєфу за абсолютною висотою. Оскільки всі басейни із середньою висотою нижче 400 м розташовані на території району, вони були віднесені до категорії низько-гірських.

Площа (рис. 17). Оскільки площі водозбірних басейнів на досліджувану територію є невеликими, то виконано стандартну класифікацію

рельєфу за середньою площею (рис. 15, табл. 3).

Таблиця 3

Основна статистика (площа, км²)

мінімум	0,000447
максимум	11,9356
середнє	2,3852
медіана	702,44
мода	736,87
СКВ	2,1645

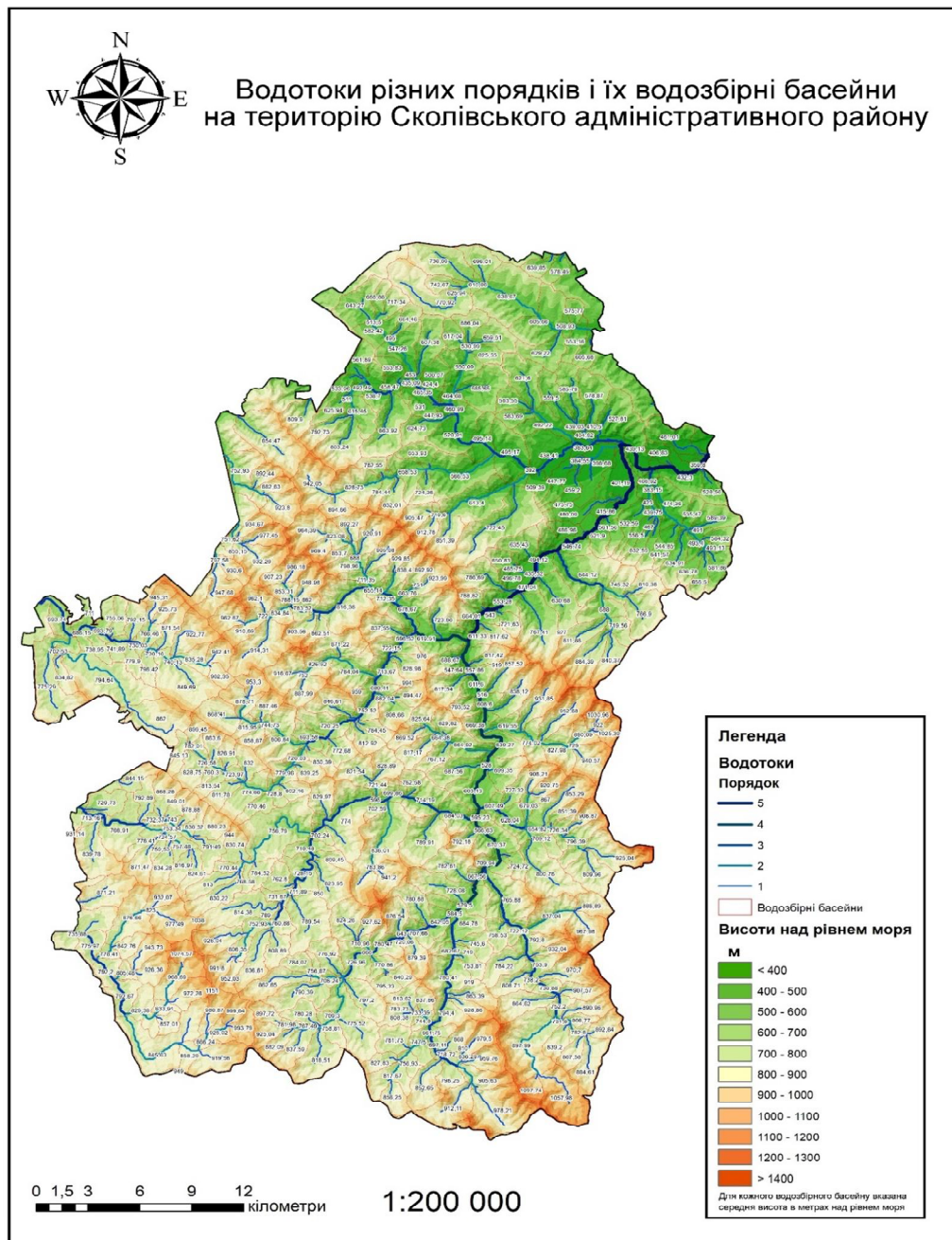


Рис. 16. Карта водотоків різних порядків і їхніх водозбірних басейнів на території Сколівського адміністративного району

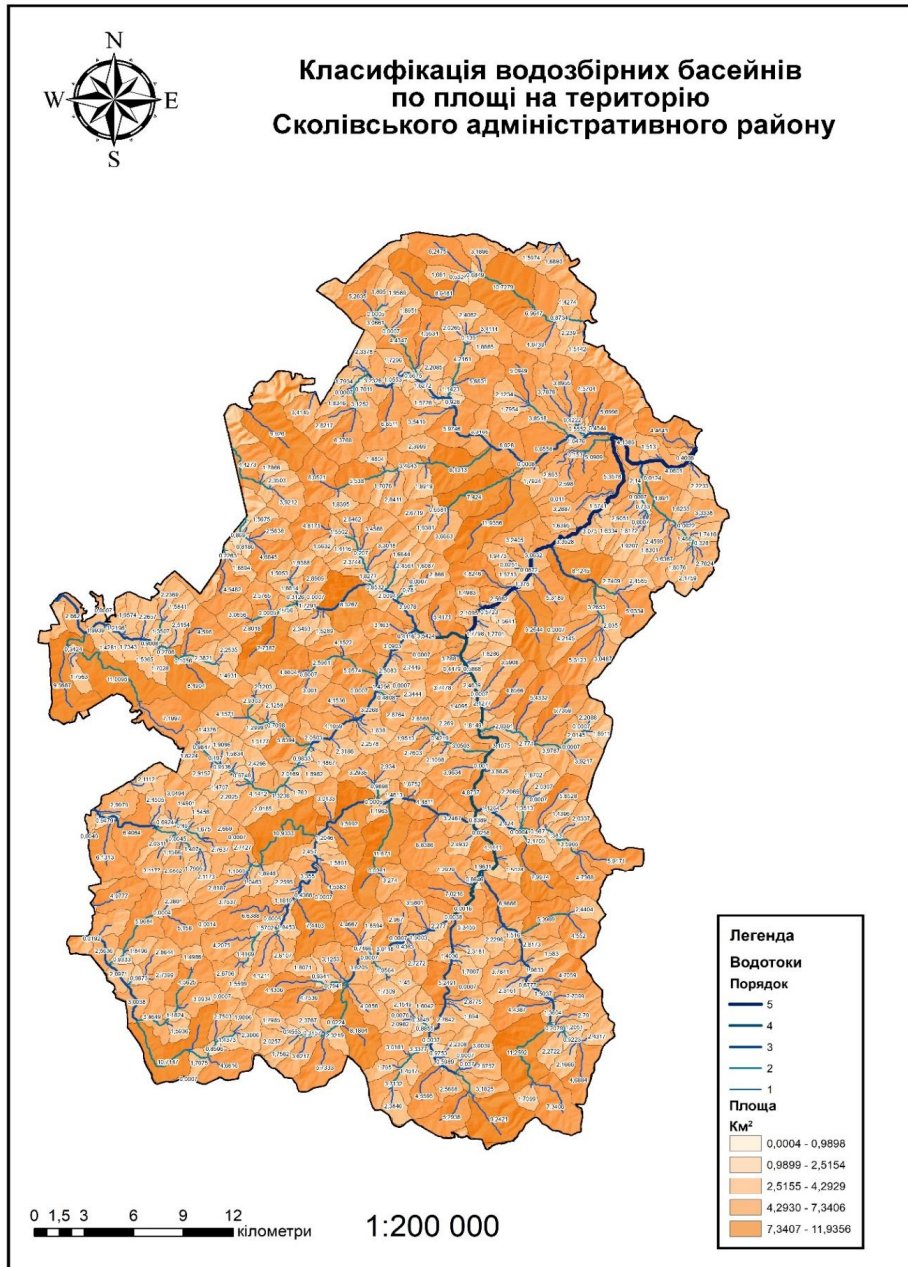


Рис. 17. Карта класифікації басейнів за площею на території Сколівського адміністративного району

Оцінка точності

Точність отриманих морфометричних характеристик в першу чергу пов'язана з точністю вхідних ЦМР. Оскільки для аналізу рельєфу великих частин України у вільному доступі є лише карти масштабу 1:100000 (карти крупнішого масштабу засекречені або обмежені у використанні) або дані SRTM, які є більш точними, ніж карти такого масштабу, було вирішено використовувати глобальну цифрову модель. За літературними даними середня

абсолютна похибка по висоті SRTM становить менше 10 м. Відповідно до зведеного звіту варіації даних ASTER GDEM середня точність по висоті становить близько 20 м. Для проведення оцінки точності отриманих результатів використані векторизовані горизонталі, позначки висот і гідрографія листа топографічної карти масштабу 1:50 000. На цих даних в програмі ArcGIS за допомогою інструменту *Toro to Raster* побудована ЦМР. Для того щоб виключити з оцінки похибки, пов'язані з

генералізацією, просторове розрізнення опорної ЦМР було задане також 100 м.

Оцінювалася точність двох параметрів: абсолютна висота і нахил. Глибина безпосередньо залежить від абсолютної висоти. За опорною ЦМР побудований растр ухилів у градусах. За допомогою калькулятора растрів розраховані різниці між опорною та вихідною ЦМР для оцінки точності висот і різниці ухилів. Таким способом були отримані значення похибок і далі проведено їхній стандартний статистичний аналіз (табл. 4, 5).

Таблиця 4

Похибка по ухилу (м)

мінімум	7,29
максимум	3,91
середнє	-0,099
медіана	-0,07
СКВ	0,63

Таблиця 5

Похибка по висоті (м)

мінімум	-36,76
максимум	28,74
середнє	1,79
медіана	2,89
СКВ	5,34

При цьому враховано, що максимальні та мінімальні похибки в першу чергу є результатом крайових ефектів. Встановлено, що 98 % похибок по висоті лежать в межах від -11 до 12 м, а 98 % похибок по ухилу – в межах від -2 до 1,5 градусів. Отримані результати лежать у межах очікуваної точності вхідної ЦМР, що дозволяє стверджувати про достовірність розрахованих морфометричних показників на цьому рівні генералізації.

Наукова новизна і практична значущість

Ця робота представляє більше дослідження практичного вирішення прикладної проблеми. Рішення поставленого завдання за технологічною схемою виконується в програмному забезпеченні ArcGIS із використанням модулів інших невеликих програм. Наукова новизна полягає в отриманні та практичному обгрун-

туванні кількісних показників водозбірних басейнів, яке вперше було подано з такою точністю для цього регіону.

Запропоновано технологічну схему автоматизованого виділення водозбірних басейнів за цифровими моделями рельєфу на прикладі території Сколівського району Львівської області та опрацьовано методику виділення водозбірних басейнів. За цією методикою побудовані карти водотоків різних порядків та їхніх водозбірних басейнів. Проведено класифікацію басейнів по площі на територію Сколівського адміністративного району. Ці результати можуть бути використані місцевими організаціями із водних ресурсів для розв'язання тематичних завдань, зокрема для проведення моніторингових досліджень.

Висновки

В результаті експериментальних та теоретичних досліджень апробовано методику автоматизованого виділення водозбірних басейнів, а саме визначення гідрологічних та морфометричних параметрів рельєфу. Проведено ранжування басейнів за цими параметрами відповідно до існуючих класифікацій, складена серія відповідних тематичних електронних карт. Необхідно сказати, що в Сколівському районі Львівської області розташовано 590 водозбірних басейнів, а їхня площа становить 1407 км². Водозбірні басейни класифіковані за висотою, а саме низько-гірських басейнів в регіоні (6 одиниць, площа 7 км²), середньогірських (360 одиниць, площа 755 км²), високо-гірських (224 одиниці, площа 645 км²).

Класифіковано басейни за середнім ухилом: перша категорія від 0–3 градусів, дуже пологі схили – (27 басейнів, площа 7 км²), друга категорія від 9–12 градусів, покаті схили (128 басейнів, площа 303 км²), третя категорія від 12–15> градусів, круті схили (225 басейнів, площа 648 км²).

Проведено оцінку точності між опорною та вхідною моделями рельєфу, а саме для ухилу СКВ = 0,63 (м), а для висоти СКВ = 5,43 (м). Отже, в ході дослідження отримані дані про морфометрію рельєфу в басейнових геосистемах Сколівського району Львівської області. На їхній основі сформована геобаза даних, яка може використовуватися для гідролого-гео-

морфологічного моделювання, гео-екологічної оцінки території та створення ландшафтних карт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Ермолаев А. П., Мальцев К. А., Мозжерин В. В., Мозжерин В. И. Глобальная геоинформационная система «Сток взвешенных наносов в речных бассейнах Земли». *Геоморфология*. 2012. № 2. С. 50–58.
- Мальцев К. А. & Ермолаев О. П. Использование цифровых моделей рельефа для автоматизированного построения границ водосборов. *Геоморфология*, 2014. № 1. С. 45–53.
- Arthur N. Strahler (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 38(6). Pp. 913–920.
- Bors A. G (2001). Introduction of the Radial Basis Function (RBF) Networks. *Online Symposium for Electronics Engineers*. DSP Algorithms: Multimedia. (Vol. 1, No. 1. Pp. 1–7).
- Bussettini M., Percopo C., Lastoria B., Mariani S. (2015) A method for characterizing the stream flow regime in Europe. In: Lollino G, Arattano M, Rinaldi M, Giustolisi O, Marechal JC, Grant GE (eds) *Engineering geology for society and territory*, volume 3, proceedings IAEG XII congress, Springer International Publishing Switzerland. Pp. 323–326. Doi: 10.1007/978-3-319-09054-2_71.
- Damoiseaux T. (2000). Topographic map generation in high mountainous areas by means of InSAR data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33(B1), 54–61.
- González-Díez Alberto, Cecilia Giusti, Juan Remondo, Almudena De La Pedraja, Jose R. Díaz De Terán, Juan González-Lastra, Juan M. Aramburu, Antonio Cendrero (2000). Integrated data sets for land-use planning, natural hazards and impact assessment in guipuzcoa, Basque country, Spain. *The international archives of photogrammetry and remote sensing*. Vol. XXXIII, supplement b7. Amsterdam. 54–60 p.
- González del Tánago, M., Martínez-Fernández, V., & García de Jalón, D. (2016). Diagnosing problems produced by flow regulation and other disturbances in Southern European Rivers: the Porma and Curueño Rivers (Duero Basin, NW Spain). *Aquatic sciences*, 78(1). Doi: 10.1007/s00027-015-0428-1.
- Fuller, I. C., Reid, H. E., & Brierley, G. J. (2013). Methods in geomorphology: investigating river channel form. In *Treatise on geomorphology: Methods in geomorphology*. Pp. 73–91. Elsevier.
- Kinnell P. I. (2005). Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), p. 674–680.
- Lindsay J. B. (2014, April). The whitebox geospatial analysis tools project and open-access GIS. In *Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow*. Pp. 16–18.
- Maltsev K., Yermolaev O. & Mozzherin V. (2012). Mapping and spatial analysis of suspended sediment yields from the Russian Plain. *IAHS-AISH Publication*, 356. Pp. 251–258.
- Maltsev K. A., Yermolaev O. P. & Mozzherin V. V. (2015). Suspended sediment yield mapping of Northern Eurasia. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 367. Pp. 326–332.
- Meitzen K. M., Doyle M. W., Thoms M. C. & Burns C. E. (2013). Geomorphology within the interdisciplinary science of environmental flows. *Geomorphology*, 200. Pp. 143–154.
- O’Callaghan J. F. & Mark D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing*, 28(3). Pp. 323–344.
- Rinaldi M., Surian N., Comiti F. & Bussettini M. (2013). A method for the assessment and analysis of the hydromorphological condition of Italian streams: The Morphological Quality Index (MQI). *Geomorphology*, 180. Pp. 96–108.
- Tadaki M., Brierley G. & Cullum C. (2014). River classification: theory, practice, politics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 1(4). Pp. 349–367.

Mykhailo PROTSYK^{1a}, Borys CHETVERIKOV^{1a}, Oleksandr DOROZHYSKYI^{1b}, Andrii IVANEVYCH^{1b}

¹ Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, +38 (063) 1671585, e-mail: chetverikov@email.ua., ^{1a} <http://orcid.org/0000-0001-8677-1735>.

^{1b} <http://orcid.org/0000-0002-3476-9948>

METHODS OF AUTOMATED ALLOCATION OF CATCHMENT BASINS ACCORDING TO DIGITAL ELEVATION MODELS (ON THE EXAMPLE OF SKOLIV DISTRICT OF LVIV REGION)

Aim of the work. To develop a method of automated allocation of catchment basins and obtaining their hydrological and morphometric characteristics, which is based on digital terrain models. Methods and results of work. A necessary condition for the correct filling of the terrain is the presence of points of true flow at the edge of the

settlement area (if the river flows into the lake, it should not enter the calculated area completely, and otherwise incorrect results will be obtained). By performing the operation of filling the relief of the terrain, a new dem is created, which does not contain fictitious depressions and is used in the next step as input data to calculate the flow direction according to the algorithm d8. According to the proposed technological scheme it is necessary to process step by step the following six blocks: filling of closed depressions, calculation of runoff direction, calculation of total runoff, creation of point vector data set of closing points (mouth points), creation of watershed boundaries, raster-vector data conversion. Theoretical research tested the method of automated allocation of watersheds, namely the determination of hydrological and morphometric parameters of the terrain. The pools were ranked according to these parameters according to the existing classifications, a series of relevant thematic electronic maps was compiled. It should be noted that in Skole district of Iviv region there are 590 catchment areas, and their area is 1407 km². Watersheds are classified by outcrop, namely low-mountain basins in the region of 6, their area is 7 km², medium-mountain 360, area 755 km², high-mountain 224, area 645 km². Pools are classified according to the average slope: the first category from 0-3 degrees, very gentle slopes – pools 27, area 7 km²; the second category from 9-12 degrees, sloping slopes-pools of 128, the area 303 km²; the third category from 12-15> degrees, steep slopes – pools of 225, the area 648 km². The accuracy between the reference and the original relief model was evaluated. We can say that sle = 0.63 (m) slope, sle = 5.43 (m) height. Scientific novelty and practical significance. The technological scheme of automated separation of catchment basins according to digital relief models for Skoliv district of Iviv region is proposed and the method of separation of catchment basins is worked out. According to the developed method, maps of watercourses of different orders and their catchment basins and classification of basins by area on the territory of Skole administrative district, which can be used by local organizations on water resources, are constructed.

Key words: catchment basins, DEM, SRTM, morphometric characteristics, hydrological characteristics.

Надійшла 13.04.2021 р.