

ГЕОГРАФІЯ

<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-09>
УДК 504.453+004.94

Надійшла 20 січня 2021 р.
Прийнята 27 червня 2021 р.

Технологічні особливості виділення меж водозбірних басейнів засобами ГІС-технологій (на прикладі р. Брусниця)

Руслан Іванович Беспалько¹,

д. техн. наук, доцент кафедри землевпорядкування та кадастру,
¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Лесі Українки, 25, м. Чернівці, 58012, Україна,
e-mail: r.bespalko@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1225-852X>;

Тарас Володимирович Гуцул¹,

к. техн. наук, асистент кафедри землевпорядкування та кадастру,
e-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-7192-3289>

Виділення меж водозбірних басейнів – важлива гідрологічна задача, розв'язок якої визначає територію та місце потенційного збору водних мас. Точність та достовірність обробки вихідних просторових даних – запорука одержання якісних похідних морфометричних показників та подальшого моделювання різних явищ, в тому числі територіального аналізу та планування. Поява і розвиток численних ГІС-засобів дозволила суттєво спростити трудомісткість характерну для традиційного розв'язку такої задачі. Проте, різні програмні засоби реалізують різні технологічні підходи до виділення меж водозбірних басейнів. Складність застосовуваних алгоритмів формує чутливість моделей до введених параметрів, порогові значення більшості з яких користувачу пропонується задавати шляхом численних експериментальних спроб. В дослідженні розглянуто найпоширеніші ГІС-засоби з множини існуючих, що підтримують інструменти гідрології – ArcGIS, Global Mapper, SAGA GIS, Surfer. З'ясування принципів роботи гідрологічного інструментарію в різних ГІС-середовищах та застосовуваних алгоритмів було однією із задач дослідження. Для всіх програмних засобів використано однаковий набір вихідних даних, одержаний в результаті векторизації елементів рельєфу фрагменту топографічної карти. Цифрову модель рельєфу підготовлено з урахуванням вимог та особливостей гідрологічно-коректних моделей. Із метою з'ясування впливу роздільної ЦМР на результати, її виконано в трьох варіантах – 10 × 10 м; 25 × 25 м; 50 × 50 м. Результати аналізу порівняно за геометричними просторовими характеристиками та з кількісними даними гідрографічного районування, наведеними на геопорталі «Водні ресурси України». Встановлено переваги та недоліки програмних засобів. Виявлено вплив роздільної здатності вихідної ЦМР на результати моделювання меж водозбірних басейнів. Отримані результати спрямовані на підвищення точності моделювання меж водозбірних басейнів та обчислення похідних гідрографічних параметрів. Вони можуть застосовуватися для генералізації лінійних об'єктів гідрографічної мережі на картографічних зображеннях з метою відповідності ситуації та достатнього рівня деталізації.

Ключові слова: водний кадастр, водозбірна площа, генералізація об'єктів гідрографії, ГІС, річковий басейн, ЦМР, ArcGIS, Global Mapper SAGA GIS, Surfer.

Як цитувати: Беспалько Р. І. Технологічні особливості виділення меж водозбірних басейнів засобами ГІС-технологій (на прикладі р. Брусниця) / Р. І. Беспалько, Т. В. Гуцул // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2021. – Вип. 55. – С. 117-127. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-09>

In cites: Bepalko R., Hutsul T. (2021). Technological features of distribution between river basins using GIS technologies (based on the example of r. Brusnytsya). Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (55), 117-127. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-09> [in Ukrainian]

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями. Слідуючи передовому досвіду європейських країн (INSPIRE), Україна спочатку взяла курс [1], а потім і запровадила з 1 січня 2021 р. Національну інфраструктуру геопросторових даних [2]. Одним із наборів (видів) геопросторових даних є – гідрографія, в тому числі басейни водозбірні (гідрографічні одиниці).

З 1 лютого 2017 р. набув чинності Закон № 1641-VIII щодо впровадження інтегрованих під-

ходів в управлінні водними ресурсами за басейновим принципом. В умовах зростання антропогенного впливу для раціонального управління природокористуванням постає потреба пошуку оптимального балансу експлуатації геосистеми, її охорони і перетворення. Задача збалансованості земельного фонду в умовах схилового рельєфу досягається використанням басейнового принципу організації територій землекористувань.

21 грудня 2017 р. Державним агентством водних ресурсів анонсовано геопортал «Водні ресурси України» [3]. Серед переліку наявних

тематичних шарів цього ресурсу доступні райони річкових басейнів та суббасейнів зокрема. Їх виділення здійснено на основі Методики гідрографічного та водогосподарського районування території України [4] відповідно до вимог Водної рамкової директиви Європейського Союзу [5].

Згідно пункту 2.5. Порядку здійснення гідрографічного районування встановлення (виділення) гідрографічних одиниць і визначення їх меж проводиться на основі топографічних карт (масштабу 1:200000 з додатковою деталізацією окремих ділянок кордонів гідрографічних одиниць на картах масштабу 1:50000) і цифрових моделей рельєфу з використанням геоінформаційних технологій [4].

При цьому, зазначена методика не деталізує за якими методами та в яких ГІС-засобах повинно відбуватися цифрове моделювання рельєфу. Тому, ймовірно одержання суттєво різних результатів під час розробки планів управління річковими басейнами, котрі обов'язково повинні включати нанесені на карту межі басейнів та суббасейнів, що відносяться до даного річкового басейну.

Результати структурного аналізу рельєфу дозволяють одержувати гідрологічно-коректні ЦМР, на основі яких може бути визначено мережу потенційних водотоків, здійснено ортотрансформування матеріалів ДЗЗ, заплановано заходи протиерозійного захисту території (компоненти універсального врівноваження змиву ґрунтового покриття – ULSE), сформовано екологічно стійкі агроландшафти, зменшено рівень забруднення водойм, підвищено врожайність сільськогосподарських культур та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ключовим елементом формування поверхневого стоку є рельєф місцевості. Пропонована Карпінським Ю. О. та Лященком А. А. орографічно-триангуляційна модель рельєфу дає змогу вирішити картографічну проблему рельєфної неоднозначності, що дозволяє визначати висоту у будь-якій точці місцевості в межах області визначення, коректну за точністю та морфологією рельєфу [6].

Оскільки поняття рельєфу є поліфункціональним, то в контексті геоморфологічного аспекту сучасні дослідження наведено в [7].

На якість створюваної цифрової моделі, крім застосовуваних методів та підходів значний вплив спричинюють і джерела вихідних даних. Теоретичні та методологічні основи цифрового моделювання рельєфу за фотограмметричними та картографічними даними, які сприяють високоточному моделюванню рельєфу наведено в працях Бурштинської Х. В., зокрема в [8]. Тенденції використання комп'ютерного моделювання

рельєфу з використанням даних ДЗЗ розглядаються в [9] та [10].

Безпосередньо гідрографічним районуванням території України відповідно до вимог Водної рамкової директиви ЄС займалися в 2013 р. вчені Київського національного університету імені Тараса Шевченка та Вінницького національного технічного університету разом з фахівцями Держводагенства України. Авторський колектив: Гребінь В. В., Мокін В. Б., Сташук В. А., Хільчевський В. К., Яцюк М. В., Чунарьов О.В., Крижановський Є. М., Бабчук В. С., Ярошевич О. Є. [11].

Вдосконалення існуючої схеми гідрографічного районування території України за даними ЦМР SRTM HydorSHEDS та ГІС-засобів запропоновано Глоткою Д. В [12].

Басейновому принципу управління водними ресурсами присвячено багато досліджень, зокрема Боровицької А. Г. [13], Кулько А. В, Яремак З. В. та інших.

Аналіз інформаційного наповнення, повноти відомостей, просторової точності зображення та відповідності об'єктів гідрографії на геопорталі «Водні ресурси України» міститься в [14].

Виділення не вирішених частин загальної проблеми. В дослідженні розглядаються лише деякі із множини існуючих ГІС-засобів. Вихідні дані у вигляді аркуша топографічної карти номеклатури М–35–XXXII не задовольняють вимоги щодо актуальності даних та періодичності оновлення відповідних матеріалів. Такий вибір зумовлено їх використанням під час реалізації методики гідрографічного районування, а також їх доступністю в мережі Інтернет. Порогове значення сум напрямків стоку в процесі моделювання меж водозбірної площі басейну р. Брусниця приймалося сталим для всіх ГІС-засобів наведених у табл. 2. Це було пов'язано з виявленням відмінностей серед результатів та коректністю їх порівняння. Спроби з'ясування оптимального значення цього параметру наведено в табл. 1.

Мета статті. Порівняти результати виділення меж водозбірного басейну в ГІС-засобах за однаковими вихідними даними.

Виклад основного матеріалу. Річка Брусниця – гідрографічний об'єкт, в межах Сторожинецького (верхів'я) і Кіцманського районів Чернівецької області. Права притока р. Прут (басейн Дунаю). Згідно відомостей [15] відноситься до класу малих річок. Витік річки розпочинається в районі Прут-Сіретського межиріччя. Загальна довжина становить 26,0 км, а площа басейну – 110 км². Аналогічні показники наводяться в Каталозі річок України 1957 року, де р. Брусниця занесена під № 294 [16].

Досліджуваний об'єкт гідрографії в повному

обсязі потрапляє в межі трапеції номенклатурного аркушу масштабу 1:200000 (М-35-XXVII Черновці), і не містить елементів ділянок державного кордону, а отже не потребує окремої деталізації у вигляді залучення аркушів топографічних карт масштабу 1:50000 [17].

Реєстрацію растрового зображення топографічної карти проведено методом поліномів n -го порядку в світовій геодезичній системі координат WGS-84. Опорними точками використано координати 9 пунктів державної геодезичної мережі, значення яких вибрано з каталогу. Встановлено, що на даному растровому зображенні більша кількість опорних точок не сприяє підвищенню точності реєстрації. Похибка реєстрації растрового зображення не перевищила значення 1 пікселя.

Для створення гідрологічно коректної ЦМР (рис. 1) векторизовано поверхні висот (точкові об'єкти), горизонталі із значенням висот (лінійні об'єкти), водотоки (лінійні об'єкти), обриви (лінійні об'єкти), озера (полігональні об'єкти). Додатково взято до уваги межі території дослідження (полігональний об'єкт) та області, в яких значення висот будуть ігноруватися алгоритмом інтерполяції (полігональні об'єкти). Слід зауважити, що водотоки повинні векторизуватися за напрямком стоку, а обриви – зліва на право (ліва сторона – низька, права – висока).

Враховуючи рекомендації ГІС ArcGIS щодо підвищення точності побудови поверхонь здійснено пакетне перетворення (*BatchProject*) вхідних просторових даних в універсальну поперечну проекцію Меркатора – UTM Zone 35 N.

Під час цифрового моделювання рельєфу область розширення (в комірках) прийнято за замовчуванням рівною – 20. Мінімальні та максимальні значення Z , використані для інтерполяції знаходяться в діапазоні від 180 м до 500 м відповідно до умов рельєфу території. За алгоритмом *ENFORCE* враховано примусове заповнення локальних понижень та областей депресії. Первинний (переважний) тип вхідних даних – горизонталі рельєфу. Максимальне число повторень процесу інтерполяції прийнято за 30. Такий показник видаляє меншу кількість не коректних локальних понижень. Фактор шороховатості – 0, оскільки переважний тип вхідних даних – горизонталі. Фактор шороховатості кривизни профілю прийнято для середньої кривизни в 0,5. Фактор похибки дискретизації встановлено на середньому рівні в 2. Значення вертикальної середньої похибки прийнято за 0. Вважаємо, що використання топографічної карти, як достовірного джерела даних, а також топологічних перевірок векторизації і занесення значень атрибутів мінімізуючим фактором допущення випадкової по-

хибки для висотних даних. Значення параметру «допуск 1», котрий відповідає за точність та щільність висотних точок відносно дренажних характеристик поверхні приймемо пропонованим за замовчуванням для горизонталей – 2,5. Значення параметру «допуск 2», котрий перешкоджає руху стоку через нереально високі бар'єри приймемо пропонованим за замовчуванням для горизонталей – 100.

Найважливішою умовою створення гідрологічно коректної ЦМР та визначення гідрографічних характеристик річок та їх басейнів є визначення лінійних розмірів растрової комірки. В роботі [18], розглянуто алгоритм оцінки впливу розмірів комірки на точність розрахунків. Мінімальне значення розміру комірки a_{min} , при якому в повному обсязі відображаються всі характерні умови рельєфу є величина 0,2 мм в масштабі вихідної карти.

Результати цифрового моделювання експортуємо у вигляді растрового 32-бітного зображення з різними розмірами комірок: 10×10 м, 25×25 м та 50×50 м без стиснення до TIFF формату. Вибір різної роздільної здатності растрового зображення обумовлений спробою з'ясувати її вплив на точність моделювання. На цьому етапі, підготовку вихідних даних вважатимемо завершеною.

Виділення меж водозбірної площі розпочнемо в середовищі найбільш розповсюдженої на сьогодні ГІС – *ArcGIS 10.2*. Для цього, на підготовленому растрі здійснимо заповнення локальних понижень (*Fill*), в яких містяться комірки з невизначеним напрямком стоку. Частина таких об'єктів не пов'язана з природними утвореннями рельєфу, а є своєрідними артефактами, котрі виникають внаслідок роздільної здатності зображення. Створюємо растр напрямку стоку із кожної комірки до найближчої сусідньої вниз по схилу найбільшої крутизни (*Flow Direction*). Оптиміальних результатів при створенні растру напрямку стоку можна досягнути, якщо активувати пункт стік із крайніх комірок спрямований назовні (*Force all edge cells to flow outward*). Обчислимо сумарний стік, як сумарну вагу всіх комірок, впадаючих в кожену комірку вниз по схилу вихідного растру (*Flow Accumulation*). В налаштуваннях сумарного стоку слід передбачити наявність цілих значень в створюваній растровій поверхні та класифікувати результати за двома діапазонами. Сформуємо умову на підставі використання растрів локальних понижень та сумарного стоку (*Con*). Впорядкуємо водотоки за методом Страхлера використовуючи растр водотоків з попередньою умовою та растр сумарного стоку (*Stream Order*). Одержаний результат водотоків перетворимо в просторовий об'єкт вико-

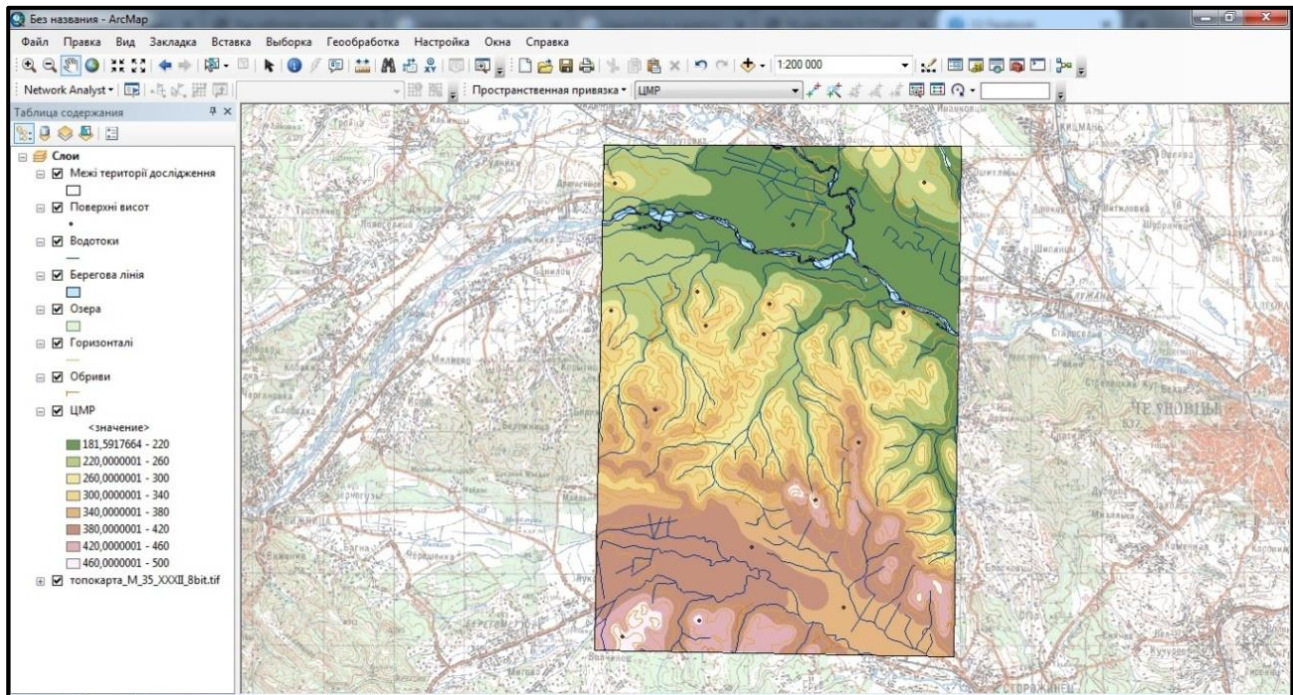


Рис. 1. Гідрологічно коректна ЦМР території дослідження в середовищі ArcGIS (побудовано авторами).

Fig. 1. Hydrologically correct DEM of the study area in the ArcGIS environment

ривуючи растр водотоків та растр напрямку стоку (*Stream to Feature*). Створюємо растр, який містить контури басейну (*Basin*). Конвертуємо басейни із растрового шару в полігональний векторний. Створюємо точки витоку. Прив'язуємо точки витоку (*Snap Pour Point*). Таким чином, ми вказуємо на пошук комірок з найвищим значенням сумарного стоку в межах величини допуску навколо заданих точок витоку і переміщуємо точку витоку в це положення. Запускаємо інструмент водозбірної області (*Watershed*) та завантажуюмо в нього растр напрямку стоку, а також растр точок витоку. Конвертуємо растрове зображення одержаної водозбірної області в полігональний векторний шар для подальших картометричних операцій.

Під час моделювання річкової мережі та меж водозбірних басейнів необхідно знати не тільки оптимальні значення лінійних розмірів комірок растру, але і порогові значення сум напрямку стоку (k), що суттєво впливають на довжину та кількість об'єктів водотоків. Така задача може бути розв'язана шляхом порівняльного аналізу модельної та топографічної карт заданого масштабу (як візуального пошарового порівняння, так і розрахункових значень сукупної довжини рік в межах будь-якого водозбору) [19].

Для моделювання річкової мережі та водозбірного басейну необхідний підбір оптимальних параметрів, які є поєднанням лінійних розмірів растрового зображення та порогових значень сум напрямків стоку [19]. Останні обмежують дов-

жину та кількість об'єктів водотоків: чим вище порогове значення, тим менша кількість об'єктів водотоків та їх довжина і навпаки. Таким чином, порогове значення є параметром генералізації річкової мережі, при відповідних лінійних розмірах растрового зображення.

В іноземних джерелах [20] мінімальне порогове значення сум напрямків стоку визначається через M значень рядків зображення, N значень стовпців зображення та експериментальну константу C :

$$A_{min} = (M \times N) / C \quad (1)$$

В свою чергу A_{min} не є фіксованою величиною, і може набувати різних значень для растрових поверхонь різної розмірності. В [20] зазначається, що оптимальний A_{min} можна визначити шляхом тривалого тестування методом спроб і помилок. При цьому, важливо коректно розрахувати константне значення C .

Враховуючи результати, одержані в [19] підбір параметру k було розпочато із значення 5000 (табл. 1). За величину фактичної суми прийнято загальну довжину річкової мережі в межах басейну р. Брусниця, виміряну за даними топографічної карти. Підбір оптимальних параметрів проведено для різних комбінацій лінійних розмірів комірок растрового зображення та порогових значень сум напрямків стоку k .

Із табл. 1 можна виявити, що найбільша схожість сум довжин річкової мережі виділених в ГІС Global Mapper та Surfer досягається при

розмірах комірок растра 10×10 м та порогових значеннях сум напрямку стоку понад 8000 та 10000 відповідно. Саме такі параметри генералізації гідрографії відтворюють річкову мережу подібну до зображеної на топографічній карті масштабу 1:200000. Крім того, між значеннями k

та розмірністю комірок a було розраховано коефіцієнти кореляції r та встановлено дуже високий рівень зв'язку (за шкалою Чеддока) у всіх випадках. Таким чином, значення k піддається розрахунку шляхом проведення кількох тестувань і побудовою відповідного графіку.

Таблиця 1 / Table 1

Моделльні значення сум довжин р. Брусниця в межах водозабору і їх відхилення (%) від фактичної суми (84 220 м) при різних розмірах комірок ЦМР та значень параметру k (розраховано авторами). Model values of the sums of the lengths of the Brusnytsia River within the water intake and their deviations (%) from the actual amount (84,220 m) at different sizes of DEM cells and values of the parameter k

ГІС	Global Mapper						Surfer					
	10×10		25×25		50×50		10×10		25×25		50×50	
Розмір комірки a ЦМР, м												
Значення k	м	%	м	%	м	%	М	%	м	%	м	%
5000	109200	+30	49660	-41	29140	-65	116900	+39	55850	-34	27520	-67
6000	99720	+18	44580	-47	28060	-67	110700	+31	50400	-40	26290	-69
7000	94850	+13	40950	-51	26290	-69	104900	+25	46890	-44	24320	-71
8000	87800	+4	37350	-56	24230	-71	100400	+19	41950	-50	22020	-74
9000	80250	-5	34220	-59	23610	-72	95860	+14	38990	-54	21140	-75
10000	72670	-14	32560	-61	22220	-74	90570	+8	37130	-56	20040	-76
Коефіцієнт кореляції r	-0,99		-0,99		-0,99		-0,99		-0,99		-0,99	

В середовищі ГІС *Global Mapper 16* виділення меж водозбірних площ (табл. 2) розпочинається із завантаження вихідних даних та вибору функції генералізації вододілу (*Generate Watershed*). Значення порогу потоку може задаватися кількістю комірок або площею зони стоку. При цьому, передбачена генералізація об'єктів гідрографічної мережі, де можна відкинути потоки менші за задане значення. Слід зауважити, що враховуючи «Основні положення створення та оновлення топографічних карт...» на картах масштабів 1:50000-1:200000 річки та струмки наносять як правило, довжиною в масштабі карти 1 см та більше [21] (в даному випадку, цenz довжини об'єкта гідрографії – 2 км).

Окремим точковим шаром задаються точки витоку (*Operation at Selected Locations*). Покращення моделювання досягається введенням значення максимальної глибини западин, що будуть заповненні (*Depression Fill Depth*). Роздільна здатність результатів одержаного растрового зображення (*Resolution*) та спосіб його передскретизації (*Resampling*) задаються користувачем.

Виділення меж водозбірної площі в середовищі ГІС *Surfer 16* (табл. 2) полягає у створенні нової карти (*New Map Watershed*) та завантаженні вихідних даних. Виділення файлу поверхні у вікні Contents дозволяє почати налаштування параметрів, які полягають у введенні значення кількості комірок сум порогу стоку (*Threshold*),

додаванні файлу точок витоку (*Pour Point Source*) та застосуванні заповнення западин (*Fill Depressions*). Значення останнього, на відміну від *Global Mapper* користувач не вводить. Решта налаштувань полягають у зміні стилів ліній водотоків та кольорів заливки виділених басейнів.

Геоінформаційна система *SAGA GIS 2.3.2* (*System for Automated Geoscientific Analyses*) інсталювалася та використовувалася сумісно з *QGIS 3.10.13*. Виділення меж водозбірної площі розпочиналося із перепроціювання (*Warp (reproject)*) вихідних даних в середовищі *QGIS* в універсальну поперечну проєкцію Меркатора – *UTM Zone 35 N*. На видозміненому растрі заповнювалися локальні пониження та неточності (*Fill Sinks (Wang & Liu)*). Сумарний стік обчислювався зверху вниз від найвищого до найнижчого значення висот з урахуванням заповненого растру локальних понижень та неточностей за методом *D8 (Flow Accumulation (Top – Down))*. За одержаними даними виділено мережу водотоків (*Channel Network*). В модулі *Upslope Area (interactive)* встановлено точку витоку та одержано растрові зображення водозбірної площі для різних розмірів комірки. В середовищі *QGIS* перетворено результати у векторні дані (*Polygonize (Raster to Vector)*) та виконано подальші картометричні операції (табл. 2).

Морфометричні характеристики водозборів, крім кількісних показників дають уявлення

про форму, розміри і просторове положення водозбору (рис. 2). До цих характеристик відносять: площу, середню висоту, середній ухил схилів, густина річкової мережі, густина руслової

мережі, площа замкнутих западин, координати гіпсографічної кривої, коефіцієнт каналізування річкової мережі (частково наведено в табл. 2) [22].

Таблиця 2 / Table 2

Порівняння деяких кількісних показників в межах водозбору р. Брусниця в різних ГІС (розраховано авторами).

Comparison of some quantitative indicators within the catchment area of the Brusnytsia River in different GIS

Джерела даних		Параметри порівняння						
		Розмір комірки <i>a</i> , м	<i>S</i> водозбірного басейну, км ²	Довжина р. Брусниця, км	Річкова сітка в межах басейну, км	Густина річкової сітки, км/км ²	Відмітка витоку, м	Відмітка гирла, м
Геоінформаційна система	ArcGIS	10×10	129,40	25,41	52,58	0,41	367,6	189,1
		25×25	129,90	23,11	36,61	0,28	368,3	189,8
		50×50	125,00	20,92	20,92	0,17	341,2	183,9
	Global Mapper	10×10	120,40	25,25	108,00	0,90	398,7	189,1
		25×25	120,30	20,20	49,66	0,41	358,2	190,1
		50×50	131,50	23,36	29,05	0,22	341,2	184,0
	Surfer	10×10	129,40	26,58	116,90	0,90	368,1	195,0
		25×25	129,90	25,06	55,85	0,43	368,6	189,8
		50×50	127,40	21,69	27,52	0,22	370,5	193,4
	QGIS & SAGA GIS	10×10	118,00	21,42	47,16	0,40	365,2	193,9
		25×25	118,60	22,47	37,65	0,32	364,5	193,0
		50×50	118,50	22,78	33,25	0,28	369,6	192,9
Топограф. карта М-35-XXVII [25]		11×11	120,40	21,50	83,56	0,69	378,5	189,0
Геопортал «Державний водний кадастр...» [23]			110,00	26,00	–	0,24	365,0	185,0

Аналізуючи дані табл. 2 та рис. 2 можна помітити, що значення площі басейну р. Брусниця сформоване засобами ГІС за даними топографічної карти М-35-XXXII у всіх випадках є більшим, ніж наведено в офіційних статистичних виданнях. Величина розходження коливається в діапазоні від 8 км² до 25 км², або від 7 % до 15 % від заявленої площі. Загальна конфігурація усіх одержаних форм узагальнено ідентична. Найбільші відмінності виявлено в результатах моделювання за даними SAGA GIS, що пояснюється появою артефактів в рівнинній південно-західній частині. Окрім того, можна помітити тенденцію зміщення північно-східної частини басейну із збільшенням значення розміру комірки, яка безпосередньо пов'язана із ручним встановленням точки витоку (впадання до р. Прут).

Висновки. Правильне встановлення місцеположення та точне нанесення на картографічний матеріал меж водозбірних ділянок водних об'єктів має вирішальний вплив на точність визначення їх площ. В свою чергу, площа водозбору часто є похідною величиною під час визначення інших гідрографічних характеристик, що

обумовлює необхідність їх розрахунку з гранично можливою точністю.

Незважаючи на вивченість використовуваних в ГІС-засобах алгоритмів гідрологічного моделювання, найскладнішим залишається особлива чутливість моделей до введених параметрів.

Здійснено спробу з'ясувати оптимальне значення порогової суми стоку (*k*) в ГІС засобах Surfer 16 та Global Mapper 16. Побудовано серію водозборів із зміною значення цього параметру. Встановлено кореляційну залежність (дуже високий рівень зв'язку), що полягає у зменшенні довжини та кількості виділених об'єктів водотоків при збільшенні порогового значення суми стоку (*k*). Таким чином, результати можна використовувати не лише для генералізації об'єктів гідрографічної мережі в межах виділених водозбірних басейнів, а й досягнення потрібного ступеня картографічної відповідності та деталізації залежно від цілей та масштабів досліджень.

З метою виявлення впливу роздільної здатності гідрологічно коректної ЦМР на результати моделювання меж водозбірних площ вихідні дані створено в роздільній здатності: 10×10 м, 25×25 м,


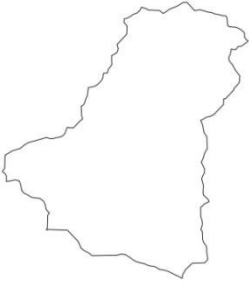






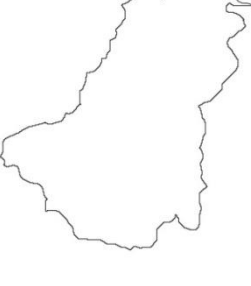
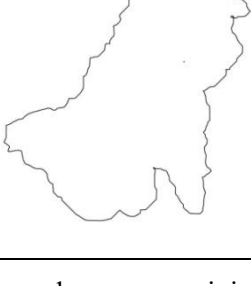
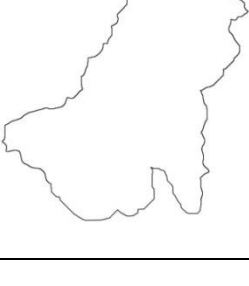
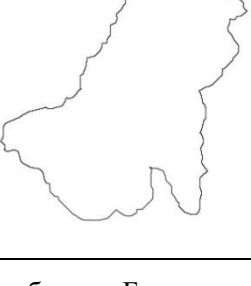
Розмір комірки, м		10×10	25×25	50×50
Геоінформаційна система	ArcGIS			
	Global Mapper			
	Surfer			
	QGIS & SAGA GIS			

Рис. 2. Порівняння форми, розмірів та просторового положення водозбору р. Брусниця в різних ГІС-засобах (одержано авторами).

Fig. 2. Comparison of the shape, size and spatial position of the catchment area of the Brusnytsia River in different GIS tools

50×50 м. Безпосереднього зв'язку не виявлено. Однак, роздільна здатність ЦМР впливає на деталізацію об'єктів гідрографічної мережі. При однаковому параметрі (k), існує лінійна залежність між розміром комірок та загальною довжиною річкової сітки в межах досліджуваних басейнів.

Таким чином, і роздільна здатність ЦМР, і значення порогової суми стоку мають безпосере-

дній вплив на похідні гідрографічні параметри (приміром, густоту річкової сітки).

При намаганні, максимально уніфіковано здійснювати процес виділення меж водозбірних площ в різних ГІС-засобах, виникали відмінності обумовлені їх алгоритмами моделювання та особливостями користувацького інтерфейсу. Слід зауважити, що у всіх випадках для напрямку стоку застосовано метод $D8$. Однак, заповнення ло-

кальних понижень, як і процеси інтерполяції у наведених ГС-засобах повністю за ідентичними параметрами провести не вдалося.

Перспективи подальших досліджень. Безумовно, актуальність використаної топографічної карти з огляду на період її видання викликає певні сумніви. Окрім цифрових даних, одержаних з топографічних карт актуальним джерелом інформації для створення ЦМР можуть бути дані радарної інтерферометрії (зйомки в радіолокаційному діапазоні).

Наразі, у відкритому доступі знаходяться тільки декілька глобальних цифрових моделей

рельєфу, створених із застосуванням технологій і суттєво відмінних між собою за просторовим охопленням і точністю. Найчастіше використовують ЦМР SRTM C-Band, SRTM X-Band, ASTER GDEM. На офіційних сайтах в спеціфікаціях програм оприлюднено усереднену точність для континентів, але локально вона може суттєво відрізнятись.

Саме тому, подальші дослідження заплановано проводити в напрямку з'ясування можливості залучення сучасних відкритих наборів висотних даних та точності виділення меж водозбірних басейнів за ними.

Список використаної літератури

1. Красоха А. Уряд затвердив Національну інфраструктуру геопросторових даних [Електронний ресурс] / А. Красоха // Українські національні новини. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: www.unn.com.ua/uk/news/1710130-uryad-zatverdiv-natsionalnu-infrastrukturu-geoprostorovikh-danikh.
2. Про національну інфраструктуру геопросторових даних: Закон України від 13 квітня 2020 р. № 554-IX // Відомості Верховної Ради України. – 2020. – № 37. – С. 277.
3. Овчаренко І. В. В Україні запроваджується кадастр поверхневих водних об'єктів [Електронний ресурс] / І. В. Овчаренко // Держводагенство офіційний сайт. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: www.kmu.gov.ua/news/irina-ovcharenko-v-ukrayini-zaprovdzhuyetsya-kadastr-poverhnevih-vodnih-obyektiv.
4. Методика гідрографічного та водогосподарського районування території України відповідно до вимог Водної Рамкової Директиви Європейського Союзу / [В. В. Гребінь, В. Б. Мокін, В. А. Сташук та ін.]. – К.: Інтерпрес ЛТД, 2013. – 55 с.
5. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. – Київ, 2006. – 240 с.
6. Карпінський Ю. О. Орографічно-триангуляційна цифрова модель рельєфу / Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко. // Вісник геодезії та картографії. – 2000. – № 3. – С. 28–33.
7. Черваньов І. Г. Флювіальні геоморфосистеми: дослідження й розробки Харківської геоморфологічної школи / І. Г. Черваньов, С. В. Костріков, Б. Н. Воробійов. – Харків: РВВ Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, 2006. – 320 с.
8. Бурштинська Х. В. Теоретичні та методологічні основи цифрового моделювання рельєфу за фотограмметричними та картометричними даними: дисертація д-ра. техн. наук: 05.24.02 / Національний ун-т «Львівська політехніка». – Л.: 2003. – 36 с.
9. Шевчук С. А. Уточнення гідрографічних характеристик річок з використанням методів ДЗЗ / С. А. Шевчук, В. І. Вишневський, П. О. Бабій. // Вісник геодезії та картографії. – 2014. – № 5 (92). – С. 29–32.
10. Свідзінська Д. В. Оцінка придатності цифрових моделей висот SRTM та ASTER для цілей гідрологічного геопросторового аналізу / Д. В. Свідзінська. // Міжрегіональний збірник наукових праць «Проблеми безперервної географічної освіти і картографії». – 2014. – №19. – С. 88–92.
11. Хільчевський В. К. Гідрографічне та водогосподарське районування України 2016 р. – реалізація положень ВРД ЄС / В. К. Хільчевський, В. В. Гребінь // Гідрологія, гідрохімія гідроекологія. – 2017. – Т. 1 (44). – С. 8–20.
12. Глотка Д. В. Удосконалення карти гідрографічного районування території України на основі SRTM HydroSHEDS / Д. В. Глотка // Фізична географія та геоморфологія. – 2014. – Випуск 3. – С. 112–118.
13. Боровицька А. Г. Правове регулювання ведення державного водного кадастру України : дис. канд. юр. наук : 12.00.06 – земельне право; аграрне право; екологічне право; природоресурсне право / Боровицька А. Г. – Харків, 2016. – 228 с.
14. Біля І. К. Аналіз геопорталу «Водні ресурси України» (на прикладі Чернівецької області) / І. К. Біля. // Часопис картографії. – 2018. – Випуск 18. – С. 25–36.
15. Державний водний кадастр: облік поверхневих водних об'єктів [Електронний ресурс] // Держводагенство. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <http://geoportal.davr.gov.ua:81>.
16. Швец Г. І. Каталог річок України / Г. І. Швец, Н. І. Дрозд, С. П. Левченко. – Київ: АН УРСР, 1957. – 192 с.
17. Топографические карты [Карты] : М–35–XXXII (Черновцы) / Генеральный штаб, 1970. – 1 к. цв., схем ; 45×42 см.
18. Яковченко С. Г. Создание геоинформационных систем в инженерной гидрологии : дис. д-ра. техн. наук : 25.00.33 – Геоинформатика / Яковченко С. Г. – Барнаул, 2007. – 406 с.
19. Пьянков С. В. Определение оптимальных параметров растровой модели при расчете гидрографических характеристик водных объектов / С. В. Пьянков, В. Г. Калинин. // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто. ИнтерГИС». – 2015. – №21. – С. 282–288.
20. Watershed Segmentation Algorithm Based on Luv Color Space Region Merging for Extracting Slope Hazard Boundaries / M. Zhang, Y. Xue, Y. Ge, J. Zhao. // International Journal of Geo-Information. – 2020. – № 9. – р. 1–17.

21. Основні положення створення та оновлення топографічних карт масштабів 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1 000 000, Наказ Головного управління геодезії, картографії та кадастру при Кабінеті Міністрів України № 156 від 31.12.99 р.
22. Руководство по определению гидрографических характеристик картометрическим способом; под ред. Л. А. Челпжиной. – Ленинград: Гидрометиздат, 1986. – 93 с.

Внесок авторів: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу

Технологические особенности выделения границ водосборных бассейнов средствами ГИС-технологий (на примере р. Брусница)

Руслан Иванович Беспалько¹,

д. техн. наук, доцент кафедры землеустройства и кадастра,
¹Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича,
ул. Леси Украинки, 25, г. Черновцы, 58012, Украина;

Тарас Владимирович Гуцул¹,

к. техн. наук, ассистент кафедры землеустройства и кадастра

Выделение границ водосборного бассейна – важная гидрологическая задача, решение которой определяет территорию и место потенциального сбора водных масс. Точность и достоверность обработки исходных пространственных данных – залог получения качественных производных морфометрических показателей для последующего моделирования разнообразных явлений, в том числе территориального анализа и планирования. Появление и развитие множества ГИС-средств позволило существенно упростить трудоемкую характерную для традиционного решения рассматриваемой задачи. Однако, разные программные средства реализуют разные технологические подходы к выделению границ водосборных бассейнов. Сложность используемых алгоритмов формирует чувствительность моделей к заданным параметрам, пороговые значения большинства из которых пользователю предлагается определять путем многих экспериментальных попыток. В исследовании рассматриваются самые распространенные ГИС-средства из множества существующих, которые поддерживают инструментальный гидрологии – ArcGIS, Global Mapper, SAGA GIS, Surfer. Выяснение принципов работы гидрологического инструментария в разных ГИС-средах и применяемых алгоритмов было одним из заданий исследования. Для всех программных средств использовано одинаковый набор исходных данных, полученный путем векторизации элементов рельефа фрагмента топографической карты. Цифровую модель рельефа подготовлено с учетом требований и особенностей гидрологически-корректных моделей. С целью выяснения влияния разрешающей способности ЦМР на результаты, ее выполнено в трех вариантах – 10 × 10 м; 25 × 25 м; 50 × 50 м. Результаты анализа сравнивались по геометрическим пространственным характеристикам и количественным данным гидрографического районирования, опубликованным на геопортале «Водные ресурсы Украины». Установлено преимущества и недостатки программных средств. Выявлено влияние разрешающей способности исходной ЦМР на результаты моделирования границ водосборных бассейнов. Полученные результаты направлены на повышение точности моделирования границ водосборных бассейнов и вычисления производных гидрографических параметров. Они могут применяться для генерализации линейных объектов гидрографической сети на картографических изображениях с целью соответствия ситуации и достаточного уровня детализации.

Ключевые слова: водный кадастр, водосборная площадь, генерализация объектов гидрографии, ГИС, речной бассейн, ЦМР, ArcGIS, Global Mapper, SAGA GIS, Surfer.

Technological features of distribution between river basins using GIS technologies (based on the example of r. Brusnytsya)

Ruslan Bespalko¹,

DSc (Engineering), Associate Professor, Department of Land Management and Cadastre,
¹Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 25 Lesi Ukrainky St, Chernivtsi, 58012, Ukraine;

Taras Hutsul¹,

PhD (Engineering), Assistant, Department of Land Management and Cadastre

ABSTRACT

Formulation of the problem. The catchment area and surface runoff volume – morphometric parameters calculated from digital terrain models – are widely used in geographic information analysis of the area. They are attributed to the block of hydrological parameters, where they are basic concepts.

The emergence and widespread usage of GIS tools has greatly simplified this labor-intensive process. However, the complexity of the applied algorithms forms the sensitivity of the models to the entered parameters, the values of most of which are selected by the user through numerous attempts and tests.

The research methodology. The study examines the most common GIS tools from many existing ones that support hydrology tools – ArcGIS, Global Mapper, SAGA GIS, Surfer. Finding out the principles of operation of hydrological tools in different GIS environments and the applied algorithms was one of the goals, the solution of which was revealed in the process of research methodology. The same set of initial data obtained as a result of vectorization of relief elements of a fragment of a topographic map of the research territory is used for all software. The digital terrain model was prepared taking into account the requirements and features of hydrologically correct models. The initial data were checked for topological correctness. In order to determine the influence of separate DEM on the results of the boundaries, its modeling was performed in three versions – 10×10 m; 25×25 m; 50×50 m. According to the same algorithm in each of the GIS tools, the boundaries of the basins were selected. The obtained map metrics were entered into comparative tables, and in some cases were subject to correlation analysis.

As a result of studies. The correct location and accurate plotting of the catchment areas of water bodies on the cartographic material has a decisive influence on the accuracy of determining their areas.

No direct relationship was found between the effect of the DEM resolution on the results of modeling the boundaries of catchment areas.

However, the resolution of the DEM affects the detail of the hydrographic network. It is established that for the same parameter (k), there is a linear relationship between the cell size and the total length of the river network within the studied basins. Despite the study of hydrological modeling algorithms used in GIS tools, the most difficult is the special sensitivity of the models to the entered parameters.

A correlation (very high level of connection) has been established, which consists in reducing the length and number of selected objects of watercourses with increasing the threshold value of the amount of runoff (k).

The scientific novelty. The obtained results are aimed at increasing the accuracy of modeling the boundaries of catchment basins and calculating the derived hydrographic parameters. They can be used to generalize hydrographic network objects within dedicated catchments and to achieve a reasonable degree of cartographic compliance and detail depending on the objectives and scope of research.

The practical significance. Thus, both the resolution of the DEM and the value of the runoff threshold have a direct impact on the derived hydrographic parameters (for example, the density of the river network).

Keywords: water cadastre, catchment area, generalization of hydrographic objects, GIS, river basin, DEM.

References

1. Krasokha A. (2018). Uriad zatverdyyv Natsionalnu infrastrukturu heoprostorovykh danykh [The government approved a national geospatial data infrastructure]. Retrived from: www.unn.com.ua/uk/news/1710130-uryad-zatverdiv-natsionalnu-infrastrukturu-geoprostorovikh-danikh. [in Ukrainian].
2. Zakon Ukrainy Pro natsionalnu infrastrukturu heoprostorovykh danykh : vid 13 kvitnia 2020 r. № 554-IX [About the national infrastructure of geospatial data]. (2020, April 13). Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, p. 277 [in Ukrainian].
3. Ovcharenko I. V. (2017). V Ukraini zaprovadzhuetsia kadastr poverkhnevnykh vodnykh ob'ektiv [A cadastre of surface water bodies is being introduced in Ukraine]. Retrived from: www.kmu.gov.ua/news/irina-ovcharenko-v-ukrayini-zaprovadzhuetsya-kadastr-poverhnevnykh-vodnykh-ob'ektiv.
4. Hrebin V. V., Mokin V. B., Stashuk V. A. ta in. (2013). Metodyka hidrohrafichnoho ta vodohospodarskoho raionuvannia terytorii Ukrainy vidpovidno do vymoh Vodnoi Ramkovoї Dyrektyvy Yevropeiskoho Soiuzu [Methodology of hydrographic and water management zoning of the territory of Ukraine in accordance with the requirements of the Water Framework Directive of the European Union]. – Kyiv: Interpres LTD [in Ukrainian].
5. Vodna Ramkova Dyrektyva YeS 2000/60/TeS. Osnovni termyny ta yikh vyznachennia [The EU Water Framework Directive 2000/60 / EU. Basic terms and their definitions]. – Kyiv [in Ukrainian].
6. Karpinskyi Yu. O., Liashchenko A. A. (2000). Orohrafichno-trianhuliatsiina tsyfrova model rel'iefu [Orographic-triangulation digital relief model]. Visnyk heodezii ta kartohrafii, 3, 28–33 [in Ukrainian].
7. Chervanov I. H., Kostrikov S. V., Vorobiov B. N. (2006). Fliuvialni heomorfofossystemy: doslidzhennia y rozrobky Kharkivskoi heomorfolohichnoi shkoly [Fluvial geomorphosystems: research and development of Kharkiv geomorphological school] – Kharkiv [in Ukrainian].
8. Burshtynska Kh. V. (2003) Teoretychni ta metodolohichni osnovy tsyfrovoho modeliuvannia rel'iefu za fotogrammetrychnymi ta kartometrychnymi danymi [Theoretical and methodological bases of digital terrain modeling for photogrammetric and cartometric data]. Extended abstract of Doctor's thesis. Lviv : «Lvivska politekhnika» [in Ukrainian].
9. Shevchuk S. A., Vyshnevskiy V. I., Babii P. O. (2014). Utochnennia hidrohrafichnykh kharakterystyk richok z vykorystanniam metodiv DZZ [Establishment of hydrographic characteristics of the river using remote sensing methods]. Visnyk heodezii ta kartohrafii, 5 (92) [in Ukrainian].
10. Svidzinska D. V. (2014). Otsinka prydatnosti tsyfrovyykh modelei vysot SRTM ta ASTER dlia tsilei hidrolohichnoho heoprostorovoho analizu [SRTM and ASTER Digital Elevation Models suitability assessment for the purposes of hydrological geospatial analysis]. Mizhrehionalnyi zbirnyk naukovykh prats «Problemy bezpererвної heohrafichnoi osvity i kartohrafii», 19 [in Ukrainian].

11. Khilchevskiy V. K., Grebin' V. V. (2017). *Hidrografichne ta vodohospodarske raionuvannya Ukrainy 2016 r. – realizatsiia polozhen VRD YeS [Hydrographic and hydroeconomic zoning of Ukraine's territory, approved in 2016 – implementation of the WFD provisions]. Hidrolohiia, hidrokhimiiai hidroekolojiia, 1 (44) [in Ukrainian].*
12. Hlotka D. V. (2014). *Udoskonalennia karty hidrografichnoho raionuvannya terytorii Ukrainy na osnovi SRTM HydroSHEDS [Improvement of the map of hydrographic zoning of the territory of Ukraine on the basis of SRTM HydroSHEDS]. Fizychna heohrafiia ta heomorfolohiia, 3 [in Ukrainian].*
13. Borovytska A. H. (2016). *Pravove rehuliuвання ведення derzhavnogo vodnoho kadastru Ukrainy [Legal regulation of maintenance of the state water cadastre of Ukraine]. Extended abstract of Doctor's thesis. Kharkiv, National University of Law [in Ukrainian].*
14. Bilia I. K. (2018). *Analiz heoportalu «Vodni resursy Ukrainy» (na prykladi Chernivetskoï oblasti) [The analysis of the geoportall Water Resources of Ukraine (for example, Chernovtsy region)]. Chasopys kartohrafiï, 18 [in Ukrainian].*
15. *Sait Derzhavnogo vodnoho kadastru: oblik poverkhnevnykh vodnykh ob'ektiv [The water cadastre: counting of surface water objects]. geportal.davr.gov.ua. Retrived from: <http://geportal.davr.gov.ua:81>. [in Ukrainian].*
16. Shvets H. I., Drozd N. I., Levchenko S. P (1957). *Kataloh richok Ukrainy [The catalog of rivers of Ukraine]. Kyiv, AN URSSR [in Ukrainian].*
17. *Topografycheskye karty: M–35–XXXII Chernovtsy (1970). [Topographic maps of Chernovtsy M-35-XXXII]. Moscow, Heneralnyi shtab [in Russian].*
18. *Iakovchenko S. H. (2007). Sozdanye heoynformatsyonnykh system v ynzhenernoi hydrolohiy [Creation of geographic information systems in engineering hydrology]. Extended abstract of Doctor's thesis. Barnaul : Institute of Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences [in Russian].*
19. *Piankov S. V., Kalynyn V. H. (2015). Opredelenye optymalnykh parametrov rastrovoi modeli pry raschete hydrografycheskykh kharakterystyk vodnykh ob'ektiv [Determination of optimal parameters of raster models in calculating the hydrographic characteristics of water bodies]. Proceedings of the International conference “InterCarto. InterGIS», 21 [in Russian].*
20. *Zhang M., Xue Y., Ge. Y., Zhao J. (2020). Watershed Segmentation Algorithm Based on Luv Color Space Region Merging for Extracting Slope Hazard Boundaries. International Journal of Geo-Information, 9. Retrived from: <https://doi.org/10.3390/ijgi9040246>.*
21. *Osnovni polozhennia stvorennia ta onovlennia topografichnykh kart masshtabiv 1:10 000, 1:25 000, 1:50 000, 1:100 000, 1:200 000, 1:500 000, 1 000 000 / Zatv. Nakazom Hol. upr. heodezii, kartohrafiï ta kadastru Ukrainy № 156 vid 31.12.99 r [in Ukrainian].*
22. *Chepelkynaia L. A. (1986). Rukovodstvo po opredeleniyu hydrografycheskykh kharakterystyk kartometrycheskym sposobom [The Guidelines for the determination of hydrographic characteristics by cartometric method]. Lennynhrad: Hydrometyzdat [in Russian].*

Authors Contribution: All authors have contributed equally to this work

Received 20 January 2021

Accepted 27 June 2021