

ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ ВОДОЗБІРНИХ БАСЕЙНІВ НА ПРИКЛАДІ ТЕРИТОРІЇ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Федик Я.І., Чепурний І.В.

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
igor.chepurnyi@gmail.com

Статтю присвячено питанню моделювання процесів поверхневого стоку для басейну річки Прут у межах Івано-Франківської області на основі цифрової моделі рельєфу з використанням модулів гідрологічного моделювання в геоінформаційних системах. Використання геоінформаційного моделювання для оцінки процесів поверхневого стоку у річкових басейнах зумовлене можливостями геоінформаційних систем аналізувати та візуалізувати дані, що стосуються водозборів, гідрографії, використання землі, типів ґрунтів та інших важливих параметрів, вони надають інструменти для аналізу і проектування, допомагаючи зменшити ризики і підвищити ефективність рішень. Гідрологічні параметри стоку, отримані за допомогою методів геоінформаційного моделювання на основі цифрової моделі рельєфу, є основою для прогнозування повеней та паводків. Ці параметри дозволяють проводити аналіз впливу різних чинників на водний режим басейну, розробляти заходи з управління водними ресурсами та оцінювати ризики природних катастроф. У процесі моделювання створено цифрову модель рельєфу на основі відкритих даних SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Для розрахунку геоморфологічних та гідрологічних параметрів використано модуль гідрологічного моделювання, що входить до складу геоінформаційних систем з вільною ліцензією. Виконано гідрологічне моделювання річкової мережі та параметрів стоку для басейну р. Прут в межах Івано-Франківської області за допомогою SAGA GIS. Визначено геоморфологічні параметри басейну (кути нахилу, експозиція схилу). Побудовано карту накопичення стоку та карти мережі водотоків (водотоків). Проведено моделювання часу надходження вод поверхневого стоку до замикаючої споруди для окремого басейну в межах басейну р. Прут. Отримана карта дає можливість оцінити час надходження води до точки замикаючого створу. При заданому часу накопичення потоку 300 хвилин час добігання води змінюється в межах 40-280 хвилин. Одержана цифрова модель рельєфу, виділені річкові басейни, дані щодо накопичення поверхневого стоку та інші гідрологічні параметри є передумовою до створення прогнозних карт ризиків розвитку паводків. *Ключові слова:* геоінформаційна система, просторові дані, цифрова модель рельєфу, гідрологічне моделювання, річкові басейни, водотоки, геоінформаційний аналіз.

Geoinformation Technologies for Modeling Surface Runoff Processes in Watersheds: a Case Study of the Ivano-Frankivsk Region. Fedyk Ya., Chepurnyi I.

The article is devoted to the issue of modeling surface runoff processes for the Prut River basin within the Ivano-Frankivsk region based on a digital elevation model using hydrological modeling modules in geographic information systems. The use of geoinformation modeling to assess surface runoff processes in river basins is due to the capabilities of geographic information systems to analyze and visualize data related to watersheds, hydrography, land use, soil types, and other important parameters. They provide tools for analysis and design, helping to reduce risks and increase the efficiency of decisions. Hydrological runoff parameters obtained using geoinformation modeling methods based on a digital elevation model are the basis for forecasting floods and high waters. These parameters allow for the analysis of the impact of various factors on the water regime of the basin, the development of water resource management measures, and the assessment of natural disaster risks. In the modeling process, a digital elevation model was created based on open SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) data. Hydrological modeling modules included in freely licensed geographic information systems were used to calculate geomorphological and hydrological parameters. Hydrological modeling of the river network and runoff parameters for the Prut River basin within the Ivano-Frankivsk region was carried out using SAGA GIS. Geomorphological parameters of the basin (slope angles, slope exposure) were determined. A runoff accumulation map and maps of the watercourse network (watercourses) were built. The modeling of the surface runoff time to the closure structure for a specific basin within the Prut River basin was carried out. The obtained map makes it possible to assess the time of water arrival at the closure point. With a given flow accumulation time of 300 minutes, the water travel time varies within 40-280 minutes. The obtained digital elevation model, identified river basins, data on surface runoff accumulation, and other hydrological parameters are prerequisites for creating predictive flood risk maps. *Key words:* geographic information system, spatial data, digital elevation model, hydrological modeling, river basins, watercourses, geoinformation analysis.

Постановка проблеми. У останні десятиріччя у світі значно зросла кількість повеней та паводків. Ці негативні явища обумовлені такими чинниками, як глобальні кліматичні зміни, динамікою річкових режимів, деградацією рослинного покриву річкових басейнів у тому числі внаслідок їх вирубок [1].

Для території України ці проблеми також є актуальними. Кліматичні зміни призводять до більш частих та інтенсивних опадів, особливо в літній період, що підвищує ризик паводків. За останнє двадцятиліття кожен рік в Україні був теплішим, ніж середньостатистичні показники за довготривалий період,

і 2020 рік став найспекотнішим роком у Європі та Україні, перевищивши на 2,8 °C середній показник 1961–1990 рр [2]. Масова вирубка лісів у Карпатах зменшує природну поглинаючу здатність ґрунтів. Відсутність ефективних систем моніторингу та раннього попередження ускладнює швидке реагування на загрозу повеней. Наслідками повеней та паводків є руйнування житла, інфраструктури, сільськогосподарських угідь, втрата життя та здоров'я людей, ерозія ґрунтів, забруднення водних ресурсів тощо.

Актуальність дослідження. Серед заходів для зменшення ризиків важливе місце посідає впровадження систем моніторингу та попередження повеней та паводків, які передбачають використання сучасних технологій для моніторингу погодних умов і рівня води у річках. Такі системи повинні базуватися на даних щодо гідрологічних параметрів водозборів, визначення та аналіз яких проводять із використанням географічних інформаційних систем (ГІС). Роль ГІС в управлінні водними ресурсами забезпечує значні переваги для оперативного моделювання ключових гідрологічних показників. Інструменти гідрологічного моделювання інтегровані до більшості сучасних повнофункціональних ГІС. Сучасні ГІС-технології використовуються для функціонування систем моніторингу та прогнозування паводків, повеней і пов'язаних небезпечних геологічних процесів, таких як селі, зсуви та річкова ерозія.

Метою даної роботи є моделювання водозбірних басейнів та процесів поверхневого стоку межах території Івано-Франківської області на основі цифрової моделі рельєфу з використанням модулів гідрологічного моделювання в геоінформаційних системах. Гідрологічні параметри стоку, що одержуються за допомогою методів геоінформаційного моделювання на основі цифрової моделі рельєфу є основою для прогнозування повеней та паводків.

Використання геоінформаційного моделювання для оцінки процесів поверхневого стоку у річкових басейнах зумовлене можливостями геоінформаційних систем аналізувати та візуалізувати дані, що стосуються водозборів, гідрографії, використання землі, типів ґрунтів та інших важливих параметрів, вони надають інструменти для аналізу і проектування, допомагаючи зменшити ризики і підвищити ефективність рішень. Завдяки геоінформаційному моделюванню можливо прогнозувати повені, селеві потоки та інші природні катастрофи, що дозволяє вчасно вживати заходи для зменшення збитків.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Загалом, питанню моніторингу, запобігання та пом'якшення наслідків унаслідок повеней та паводків присвячені програми та директиви урядових організацій. Зокрема, Європейський Союз (ЄС) має кілька програм і ініціатив, спрямованих на моніторинг та попередження паводків і повеней. Тут варто відзна-

чити Директиву ЄС про паводки (Floods Directive, 2007/60/EC) [3], яка зобов'язує держави-члени ЄС оцінювати ризики повеней, розробляти карти ризиків і планувати управління ризиками повеней. Геоінформаційне моделювання процесів поверхневого стоку у річкових басейнах є важливим, оскільки дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо управління водними ресурсами, збереження екосистем та попередження природних катастроф. Окремо слід відзначити необхідність створення карт загроз і ризиків повеней на що вказують автори [4]. Існують наукові програми які безпосередньо передбачають використання геоінформаційних технологій для збору, систематизації просторових даних. Це програма Copernicus, спостереження за Землею, яка надає дані та інформаційні послуги для моніторингу та прогнозування природних катастроф, включаючи повені. Директива INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in the European Community), яка спрямована на створення європейської інфраструктури просторових даних, яка допомагає інтегрувати та обмінюватися інформацією про ризики повеней між країнами ЄС. ряд державних програм, спрямованих на моніторинг та попередження повеней та паводків. Ці програми включають модернізацію інфраструктури, розвиток систем раннього попередження, наукові дослідження та співпрацю з міжнародними організаціями. Важливу роль відіграє інтеграція сучасних технологій для покращення управління водними ресурсами та зниження ризиків природних катастроф [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При гідрологічному моделюванні важливу роль відіграє процес структурного поділу території на гідрологічні одиниці за допомогою цифрових моделей рельєфу та обчислення їхніх параметрів. У середовищі геоінформаційних систем створюються цифрові моделі рельєфу, на основі яких розраховуються ухили, експозиції, відмивки рельєфу, напрямки стоку, акумуляція стоку та дренаж (розрахункова річкова мережа) тощо [6, 7]. У роботі [8] пропонується розподілена гідрологічна модель водозбору, яка передбачає як використання цифрової моделі рельєфу (ЦМР) водозбору, так і єдиної континуальної сутності модельних показників для всього географічного простору водозбірного басейну.

Просторова схематизація басейну є початковим етапом гідрологічного моделювання та передус оцінці параметрів моделі. Це завдання зазвичай вирішується за допомогою ГІС-технологій, які є незамінним інструментом для просторово-часового моделювання об'єктів та явищ, на основі цифрових моделей рельєфу, ґрунтових та ландшафтних карт різних масштабів, даних космічної зйомки та продуктів їх обробки. На сьогодні розроблено широкий спектр розподілених гідрологічних моделей, які по-різному інтегровані з ГІС. Більшість з цих моделей мають ГІС-інтерфейс для підготовки просторо-

вих даних, тоді як сам процес моделювання стоку часто виконується зовнішніми програмними засобами, тобто застосовується так званий мультипрограмний підхід [9]. У ГІС, що орієнтовані на звичайного користувача реалізовані лише прості та часто використовувані гідрологічні інструменти, такі як розрахунок похідних по ЦМР, виділення річкової мережі та водозборів. Найбільш потужні аналітичні можливості в галузі гідрологічних додатків мають такі пакети, як ГІС GRASS, ГІС SAGA [10].

Крім, власне, визначення гідрологічних параметрів водозборів ГІС дозволяють розраховувати додаткові параметри, які характеризують певний водозбір та впливають на формування поверхневого стоку, наприклад, це залісеність та особливості рослинного покриву водозборів [11–13].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою цієї роботи є моделювання процесів поверхневого стоку для басейну річки Прут у межах Івано-Франківської області на основі цифрової моделі рельєфу з використанням модулів гідрологічного моделювання в геоінформаційних системах. Гідрологічні параметри стоку, отримані за допомогою методів геоінформаційного моделювання на основі цифрової моделі рельєфу, є основою для прогнозування повеней та паводків. Крім того, ці параметри дозволяють проводити аналіз впливу різних чинників на водний режим басейну, розробляти заходи з управління водними ресурсами та оцінювати ризики природних катастроф.

Новизна. Полягає в застосуванні модулів гідрологічного моделювання, що входять до складу геоінформаційних систем з вільною ліцензією для оцінки гідрологічних показників території Івано-Франківської області на основі відкритих даних цифрової моделі рельєфу одержаної за даними SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Це дозволить змодельовати мережу водотоків, їх водозборів та оцінити накопичення стоку та його швидкість.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження проведено на основі відкритих даних –

цифрової моделі рельєфу одержаної за даними SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) із використанням вільного програмного забезпечення QGIS, GRASS GIS, SAGA GIS та відображає загальнометодологічний підхід з використання відкритих даних для дослідження природних явищ та процесів. Одержана цифрова модель рельєфу, виділені річкові басейни, дані щодо накопичення поверхневого стоку та інші гідрологічні параметри є передумовою до створення прогнозних карт ризиків розвитку паводків.

Виклад основного матеріалу. Будь-яка гідрологічна модель схематизує річковий басейн певним чином. Метод схематизації визначає структуру моделі і залежить від підходів, що використовуються для опису процесу формування стоку. Схематизація здійснюється шляхом поділу водозбору на схили, уздовж яких вода стікає до розрахункових ділянок річкової мережі. Результатом гідрологічного моделювання є структурний поділ території на водозбори різних порядків, а також структура річкової мережі.

У більшості сучасних моделей стоку ці розрахунки виконуються за допомогою ГІС-технологій на основі цифрових моделей рельєфу (ЦМР). Інструменти, що дозволяють визначити напрям руху води по поверхні схилів, створити модель річкової мережі та виділити водозбори різних порядків, реалізовані у багатьох сучасних ГІС-пакетах. У деяких гідрологічних моделях є власні інструменти для виконання цих операцій.

Гідрологічні модулі ГІС дозволяють моделювати параметри стоку, але основною умовою для проведення розрахунків є побудова шарів водозбірних басейнів та водотоків. Загальний алгоритм виділення водозборів, який притаманний модулям гідрологічного моделювання ГІС [14] наведений на рис. 1.

Для цих завдань існують відповідні функції в модулях «Гідрологія» у різних ГІС. Наприклад, у GRASS GIS це функція `r.watershed`, подібні функції також присутні у SAGA GIS та ArcGIS. Функція `r.watershed` використовує алгоритм, який розраховує накопичення потоку шляхом врахування кількості



Рис. 1. Порядок виділення меж водозборів

комірок у растрі висот, через які проходить умовний потік, що передає стік води через ландшафт.

Вихідними даними для гідрологічного моделювання процесів поверхневого стоку в Івано-Франківській області є цифрова модель рельєфу, отримана за даними SRTM у форматі растрового файлу. На рисунку 2 наведена картограма території досліджень з нанесеною цифровою моделлю рельєфу. За даними цифрової моделі рельєфу засобами ГІС створено зображення відмивки рельєфу, розраховано кути нахилу та експозиції схилів.

Для схематизації водозборів використовувалася функція `r.watershed` у GRASS GIS. В результаті роботи цієї функції, крім виділення водозборів, були створені растрові шари напрямків стоків, сегментів потоків та півбасейнів. Для території Івано-Франківської області за даними цифрової моделі рельєфу з використанням модуля гідрологічного моделювання GRASS GIS було виділено басейни основних річок Івано-Франківської області – Прут, Чорний Черемош, Бистриця, Лімниця та інші. Варто зауважити, що для коректної схематизації басейну річки необхідним є охоплення території що покриває два півбасейни.

Також в результаті аналізу виділено основні водотоки. Деталізація виділення водотоків, тобто мінімальне значення порядку їх виділення залежить від мінімального числа комірок цифрової моделі рельєфу за яким проводиться аналіз. Число комірок встановлюється експериментально. Інструмент

сумарний стік (Flow Accumulation) обчислює сумарний стік як сумарну вагу всіх комірок, що впадають у кожен комірку вниз по схилу вихідного растру. Якщо не надано растру ваг, кожній комірці призначається вага 1, а значенням комірки вихідного растру є кількість комірок, що «впадають» у кожен комірку. Комірки з високим сумарним стоком – це ділянки концентрованого стоку; вони можуть бути використані для визначення русел водотоків.

Прикладом використання інструменту Сумарний стік (Flow Accumulation) із вхідним растром ваг може бути визначення кількості дощових опадів, які потрапляють у заданий басейн. У такому разі вихідним додатковим растром, крім рельєфу може бути растр, що містить інформацію про середню кількість дощових опадів за певний період. Вихідні дані інструменту будуть представляти кількість опадів, що протікає через кожен осередок, при припущенні, що весь дощ, що випав, стікає по поверхні і не існує перехоплення опадів, немає випаровування, і опади не просочуються в ґрунтові води.

Детальніше розглянемо басейн р. Прут у межах Івано-Франківської області, який позначений на рис.2. Басейн р. Черемош не враховуємо, оскільки на території Івано-Франківської області розташований тільки півбасейн. Застосувавши функцію `r.watershed` та встановивши мінімальну кількість комірок растру для виділення водозбору на рівні 1000, були виділені дрібні басейни частини річки Прут у межах Івано-Франківської області. Отримані растрові шари річко-



Рис. 2. Схема території досліджень з нанесеною цифровою моделлю рельєфу

вих басейнів та водотоків були перетворені у векторний формат за допомогою функції *r.to.vect* у GRASS GIS (рис. 3).

Також було оцінено накопичення стоку (*flow accumulation*). Результуюча карта накопичення стоку містить абсолютне значення кількості поверхневого потоку, що проходить через кожну комірку растру ЦМР. Для розрахунку накопичення стоку та часу добігання потоку використано інструменти гідрологічного та геоморфологічного моделювання в геоінформаційній системі SAGA (*System for Automated Geoscientific Analyses*).

Мережу водотоків для басейну р. Прут було визначено за допомогою функції *Channel Network*.

У результаті виконання цієї функції було створено растровий та векторний файли (*shape*) (рис. 3). Після цього було застосовано функцію *Unslope Area*, яка в інтерактивному режимі дозволяє отримати контур басейну для певної точки витоку на водотоці. Для демонстрації її роботи було вибрано ділянку в західній частині басейну р. Прут, для якої було визначено контур басейну. Для цього виділеного басейну було розраховано час добігання води поверхневого стоку до замикаючого створу. На рис. 4 зображено карту добігання води поверхневого стоку до замикаючого створу, розраховану за методом *Isochrones Constant Speed (interactive)* для заданого часу накопичення стоку 300 хвилин (5 годин). Створені карти дозволя-

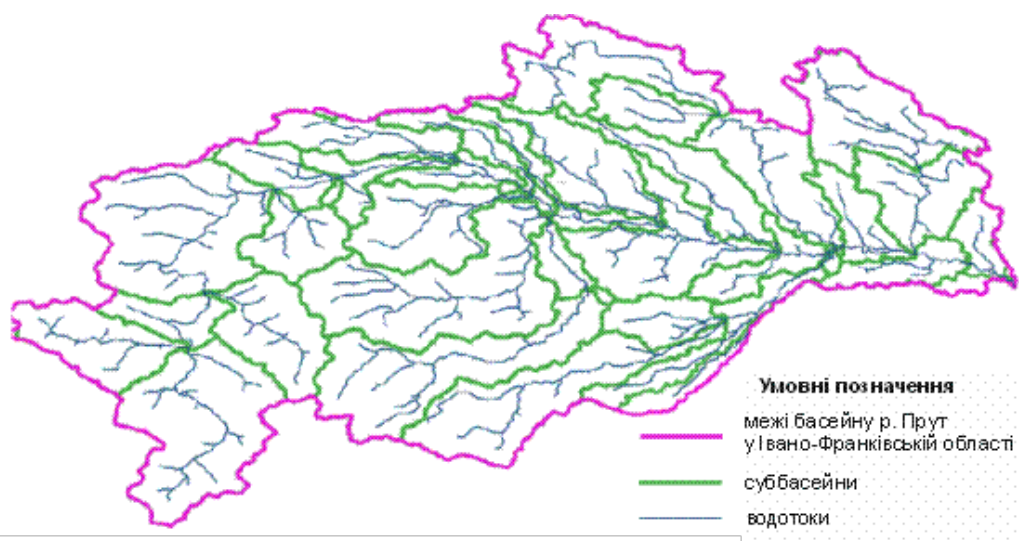


Рис. 3. Змодельовані вододіли та водотоки для басейну р. Прут в межах Івано-Франківської області

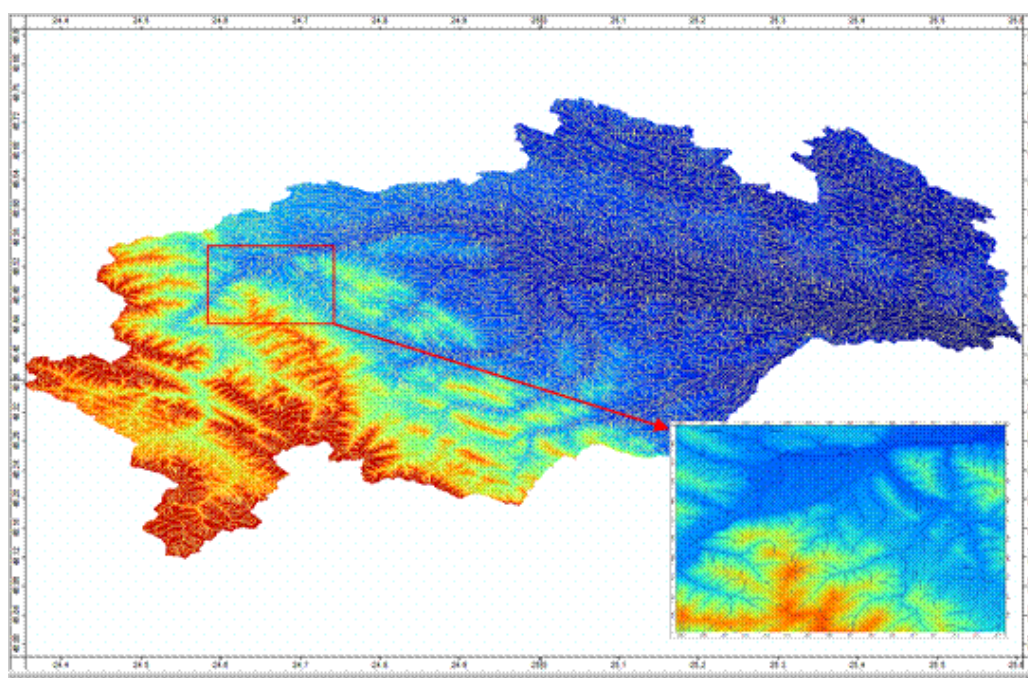


Рис. 3. Карта мережі водотоків басейну р. Прут в межах Івано-Франківської області

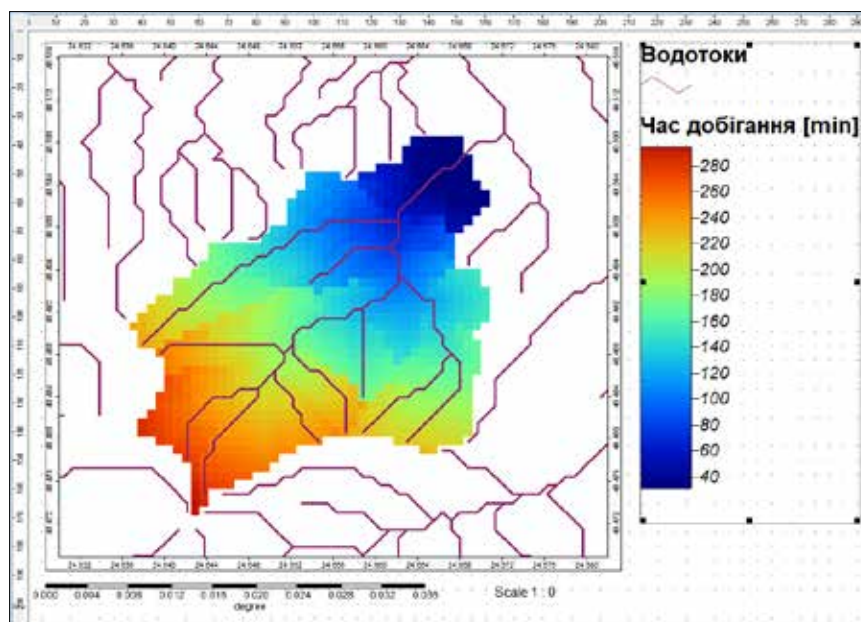


Рис. 4. Карта зміни часу добігання поверхневого стоку до замикаючого створу

ють оцінити час добігання поверхневого потоку, що утворюється під час випадання атмосферних опадів, до точки замикаючого створу.

Головні висновки. Гідрологічне моделювання процесів поверхневого стоку дозволяє оцінювати процеси стікання води схилами. Ці процеси є складними та багатфакторними, тому використання геоінформаційних технологій для цих завдань є необхідністю. За їх допомогою, наприклад, здійснюють визначення меж водозбору, мережі водотоків, процеси накопичення стоку, розбиття водозбору на схили, уздовж яких відбувається стікання води до розрахункових ділянок річкової мережі.

У більшості сучасних моделей стоку їх параметри розраховуються засобами ГІС-технологій на основі цифрової моделі рельєфу. Відповідні інструменти, що дозволяють визначити напрям руху води по поверхні схилів, створити модель річкової мережі та виділити водозбори різних порядків, реалізовані у більшості сучасних ГІС-пакетів. У даному дослідженні проведено гідрологічне моделювання річкової мережі та параметрів стоку для території Івано-Франківської області за допомогою гідрологічних модулів QGIS, GRASS GIS. У результаті виділено території водозборів, напрямки потоків, сегменти потоків, півбасейни, накопичення стоку. Проведено гідрологічне моделювання річкової мережі та параметрів стоку для басейну річки Прут в межах Івано-Франківської області за допомогою ГІС SAGA. Визначено геоморфологічні параметри басейну,

такі як кути нахилу та експозиції схилів. Створено карту накопичення стоку та карти сегментів потоку (водотоків). Важливим чинником якості проведеного гідрологічного моделювання є роздільна здатність вихідної цифрової моделі рельєфу та отриманої растрової поверхні накопичення стоку.

Проведено моделювання часу добігання води поверхневого стоку до замикаючого створу для окремого басейну в межах басейну річки Прут. Отримана карта дозволяє оцінити час надходження води до точки замикаючого створу. Для заданого часу накопичення потоку 300 хвилин час добігання варіюється в межах від 40 до 280 хвилин.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати демонструють можливість, які надають відкриті геоінформаційні системи у сфері гідрологічного моделювання на основі використання відкритих даних. Створена цифрова модель рельєфу за даними SRTM дозволяє з високою ефективністю виділяти вододіли та водотоки для гірських територій із різко розчленованим рельєфом, проте для рівнинних територій необхідні більш точні дані, тому у подальшому при створенні цифрової моделі рельєфу слід використовувати дані різних джерел у тому числі дані крупномасштабних топографічних карт тощо. Базові гідрологічні параметри басейнів – їхні контури, абсолютні відмітки, кути нахилу, експозиції, водотоки та їх акумулююча здатність є основою для подальшого моделювання розвитку повеней та паводків.

Література

1. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіз. доповідь / С.П. Іванюта, О. О. Коломієць, О. А. Малиновська та ін.; за ред. С. П. Іванюти; Київ, 2020. 110 с.
2. Wilson L., New S., Daron J., Golding N. Climate Change Impacts for Ukraine. Met Office. 2021. 34 p.
3. Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks / European Parliament, Council. 2007.

4. Spachinger K., Dorner W., Metzka R., Serrhini K., Fuchs S. Flood Risk and Flood hazard maps – Visualisation of hydrological risks. *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2008. 4 p. doi:10.1088/1755-1307/4/1/012043.
5. Shevchuk V., Burshtynska K., Korolik I., Halochkin M. Monitoring of horizontal displacements and changes of the riverine area of the Dniester River. *Journal of Water and Land Development*. 2021. 1–15 p. doi:10.24425/jwld.2021.137091
6. Бабаджанова О. Ф., Павлюк Ю. Є., Сукач Ю. Г. Сучасні системи попередження та прогнозування повеней. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2013. № 7. С. 167–171.
7. Fedoniuk M., Kovalchuk I., Zhdaniuk B., Fedoniuk V., Pavlovska T. Use of multispectral satellite imagery to monitor erosion on the Volyn upland. *XIVth International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2020. P. 1–4.
8. Костріков С.В. Розподілене гідрологічне моделювання водозбірних басейнів через ГІС-засоби. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. Серія Екологія*. 2012. № 7. С. 22–30.
9. Lindsay J.B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis // *Computers & Geosciences*. 2016. Vol. 95. P. 75–84.
10. Neteler M., Bowman M., Landa M., Metz M. GRASSGIS: A multi- purpose open source GIS. *Environmental Modelling and Software*. 2012. Vol. 31. P. 124–130.
11. Кульчицький-Жигайло І. С. Характер розташування лісів на водозборі гірської річки в Карпатах як один з чинників формування витрат води весняного водопілля. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018, т. 28, № 5. С. 69–73.
12. Олійник В.С. Фактори виникнення паводкового стоку води в гірських лісах Карпат. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.2. С. 21–26.
13. Снітинський В.В., Хірівський П.Р., Гнатів І.Р. Особливості формування поверхневого стоку гірських річок за вирубки лісів та розорювання схилів територій. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. 2020, № 3(30). С. 73–77. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.12>
14. Беспалько Р. І., Гуцул Т.В. Технологічні особливості виділення меж водозбірних басейнів засобами ГІС-технологій (на прикладі р. Брусниця). *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>