

УДК 004.9:556.3

О.В. БОЙКО

ТЕХНОЛОГІЯ ОБРОБКИ ПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ЗАСОБАМИ ГІС ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В РОЗПОДІЛЕНИХ ГІДРОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЯХ

Анотація. У статті запропонована технологія збору та обробки географічних та геоморфологічних просторових даних засобами геоінформаційних систем для подальшого використання у створенні розподілених гідрологічних моделей стоку. Описано основні етапи роботи технології, а саме ідентифікація контуру водозбору, побудова річкової мережі та отримання значень параметрів моделі водозбору з цифрових карт. На прикладі водозборів р. Уж та р. Стир проведено перевірку роботи технології для створення гідрологічної моделі. Отримана модель використана для реконструкції паводкового стоку.

Ключові слова: ГІС, інформаційні технології, розподілені гідрологічні моделі, водозбірна гідрологія.

Аннотация. В статье предложена технология сбора и обработки географических и геоморфологических пространственных данных с использованием геоинформационных систем для дальнейшего использования в построении распределенных гидрологических моделей стока. Описаны основные этапы работы технологии, такие как идентификация контура водосбора, построение речной сети и нахождение значений параметров модели из цифровых карт. На примере водосборов р. Уж и р. Стырь была проведена проверка работы технологии для создания гидрологической модели. Полученные модели были использованы для реконструкции паводочного стока.

Ключевые слова: ГИС, информационные технологии, распределенные гидрологические модели, водосборная гидрология.

Abstract. Collecting and processing technology of geographical and geomorphologic extensional data using geoinformation systems for future usage in creation of distributed hydrological reservoir models is suggested in the article. The basic stages of technology such as identification of reservoir contour, building of river network and finding the volumes of model parameters from digital maps are described. On the example of reservoirs of Uzh river and Styr river an inspection of technology for creation of hydraulic system was carried out. Received model is used for the reconstruction of the flood sink.

Keywords: GIS, information technologies, distributed runoff models, hydrology reservoirs.

1. Вступ

Ефективна природоохоронна діяльність потребує розвитку сучасних інтелектуальних інформаційних технологій прогнозування та аналізу гідрологічного режиму річок. Розв'язок таких задач полягає у створенні математичних моделей, що описують гідрологічні процеси, які відбуваються на водозборі. В сучасній практиці широко використовуються моделі річкового стоку з розподіленими параметрами [1]. В моделях такого типу водозбір представляється просторовими регулярними сітками, що складаються з елементів, кожний з яких представляє відповідну ділянку водозбору. Рівняння моделі розв'язуються для кожного елемента з відповідними йому параметрами. Таким чином, на відміну від моделей з зосередженими параметрами [2], де водозбір описується так званим «чорним ящиком», а параметри мають однакові значення в його межах, розподілені моделі враховують просторову мінливість фізико-географічних та геоморфологічних властивостей, які впливають на формування стоку. Серед розподілених моделей найбільш відомими є SHE [3], DHSWM

[4]. В Україні в останнє десятиріччя розподілені моделі водозборів розробляються в ПММС [5] та в Морському гідрофізичному інституті НАН України [6].

Створення та налаштування розподіленої гідрологічної моделі водозбору вимагає збору та обробки певної кількості просторових даних, що відбувається за допомогою геоінформаційних систем (ГІС). У ГІС просторові дані приводяться до вигляду растрових ґридів, де ґрид – це матрична структура даних, кожний елемент якої має строго визначені географічні координати та певне значення, інтерпретуючи яке можна отримати значення певного параметра моделі водозбору, як то висота поверхні, тип ґрунту, висота сніжного покриву і т.п. Сукупність таких ґридів формує набір вхідних параметрів для розподілених гідрологічних моделей. Існує велика кількість інструментів аналізу просторових даних для використання у гідрологічних моделях – основні програмні пакети – це гідрологічний модуль ARCHYDRO TOOLS, що входить до програмного комплексу ARCMAP/ARCINFO (www.esri.com), GRASS (<http://grass.fbk.eu/>), TauDEM (<http://hydrology.usu.edu/taudem>). Шляхом обробки просторових даних, насамперед карти висот, зазначені програмні пакети дозволяють визначити широкий спектр гідрологічних особливостей водозбору, таких як межі водозбору, топологію стоку води з водозбору, отримати карту річкової та струмкової мережі тощо [7, 1].

Наявні ГІС-пакети не вирішують усіх потреб обробки просторових даних для розподілених моделей річкового стоку. Тому актуальною є задача розробки спеціалізованих ГІС-технологій для розподілених гідрологічних моделей [8]. У статті представлена розроблена технологія обробки ГІС-даних для використання у розподіленій фізично-обґрунтованій гідрологічній моделі річкового стоку ТОПКАПІ-ПММС [5], що є комп'ютерною реалізацією моделі ТОРКАПІ [9]. Модель базується на застосуванні рівняння «кінематичної хвилі» для опису динаміки процесів стоку. Базуючись на головній вхідній ГІС-інформації моделі – цифровій карті висот (DEM, Digital Elevation Model) території, водозбір представляється сукупністю квадратних елементів, що утворюють розрахункову сітку моделі. Кожний елемент сітки являє собою розрахунковий вузол моделі та має свій набір фізичних характеристик, які беруться з цифрових карт висот, ґрунтів та карти типів рослинного покриву. Для кожного елемента сітки розв'язуються рівняння моделі, а сукупний стік розраховується шляхом побудови так званого «дерева стоку», «корінь» якого знаходиться в замикаючому створі водозбору. Технологія, яка описується у статті, була застосована для створення моделей водозборів Закарпаття та притоки басейну р. Прип'ять – р. Стир.

2. Технологія обробки та визначення контуру водозбору

На першому етапі створення моделі дослідник має чітко визначити контур водозбору. Визначення межі водозбору відбувається шляхом обробки цифрової карти висот регіону (Digital Elevation Model – DEM). Карта висот може бути отримана шляхом цифрування топографічних карт місцевості або взята з уже готових всевітніх цифрових ґридів, таких як SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, <http://srtm.csi.cgiar.org>).

Спочатку проводиться перевірка вхідної карти висот на наявність артефактів-«ям», а саме елементів ґриду, висота яких є меншою за висоти сусідніх 8-ми елементів. Як правило, такі артефакти властиві рівнинним водозборам або виникають у процесі створення карти висот з даних топографічної зйомки, обробки супутникових знімків тощо. Якщо комірка є «ямою», то значення висота виправляється згідно з рекурсивним алгоритмом, описаним у [10]. Програмні реалізації цього алгоритму включені у більшість ГІС. Для моделі ТОПКАПІ-ПММС використовується програмний пакет TauDEM (<http://hydrology.usu.edu/taudem>). Виправлений DEM застосовується для знаходження напрямків руху води у кожному елементі ґриду. Основним загально прийнятим методом є так званий D8 (вісім напрямків руху) [10], який базується на припущенні, що вода з кожного елемента надходить

до одного з сусідніх елементів згідно з принципом найменшої дії, а саме до елемента, з яким різниця висот є найбільшою. На виході отримується ґрид тієї ж самої розмірності, що і вхідний DEM, де кожному елементу присвоюється значення від 1 до 8 в залежності від знайденого напрямку руху води (південь, північ, схід, захід і т.д.).

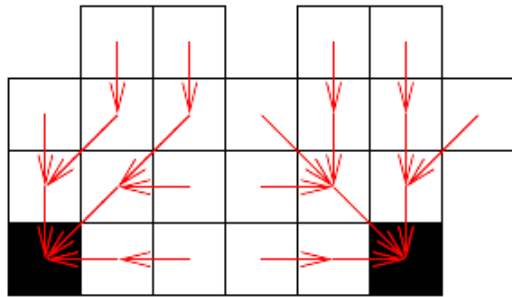


Рис. 1. Схематичне зображення дерева стоку, яке використовується у моделі ТОПКАПІ-ІПММС. Чорний квадрат – замикаючі

кві (елементів, що належать контуру водозбору).

Потік даних про стік води, сформований із результатів розв’язку рівнянь моделі для елементів дерева, надходить від нащадків до батьків згідно з алгоритмом обходу дерева, яке має назву *post-order tree traversal* [11].

3. Технологія побудови річкової мережі

У моделі ТОПКАПІ-ІПММС існують два типи елементів дерева стоку водозбору: ті, для яких розраховується поверхневий сток, і ті, які належать руслам природних водотоків і для яких, відповідно, розраховується русловий сток. Ідентифікація елементів, які є руслами природних водотоків, проводиться згідно з методом, описаним у [1]. Наявність русла у довільному елементі водозбору визначається як функція від площі всіх елементів, вода з яких надходить до нього. Відповідно, чим для більшої кількості елементів даний елемент є «батьківським» у «дереві стоку», тим вірогідніше, що він є руслом річки чи струмка. Наявність русла і його ширина визначаються таким чином:

$$A_{dr} > A_{th}, \quad (1)$$

$$w_i = w_{max} + \left[\frac{w_{max} - w_{min}}{\sqrt{A_{tot}} - \sqrt{A_{th}}} \right] \left(\sqrt{A_{dr}} - \sqrt{A_{tot}} \right), \quad (2)$$

де перший вираз є перевіркою на наявність русла в елементі, а саме, якщо A_{dr} – площа території, вода з якої надходить до елемента водозбору, більше за певне порогове значення площі A_{th} , яке задано в залежності від гідрологічних особливостей водозбору, то елемент є руслом; w_i – ширина русла в i -ому елементі; w_{max} та w_{min} – максимально та мінімально можлива ширина русла відповідно, значення яких задається в залежності від гідроморфологічних особливостей водозбору; A_{tot} – загальна площа водозбору як сума площ всіх елементів водозбору, з яких побудоване «дерево стоку».

Отримана річкова мережа розбивається на секції, де секція визначається як частина річки, вздовж якої немає приток, і для кожної секції розраховується величина її порядку. Ця величина в гідрологічній практиці має назву число Страхлера [12]. Знаходження відбувається згідно з наступним правилом: секція вважається ногою дерева, де наступна секція

вниз за течією є її батьківською ногою. Якщо секція немає нащадків, вона є секцією першого порядку. Коли дві секції першого порядку перетинаються, вони утворюють секцію другого порядку і так далі. Якщо у секцію річки порядку N впадає секція порядку $N-1$, то батьківська секція не змінює порядок. Таким чином, кожному елементу водозбору, що є частиною річкової мережі, присвоюється відповідне число Страхлера. Ця інформація необхідна для задання просторово-розподіленого коефіцієнта гідравлічної шорсткості русла для модуля стоку у руслах річок моделі ТОПКАПІ-ІПММС.

4. Технології отримання інформації про параметри моделі з довільних цифрових карт

Як було зазначено у вступі, розподілені моделі використовують певну кількість просторових даних для ідентифікації значень параметрів. Параметри умовно можна поділити на три типи:

1. Параметри, значення яких задаються однаковими для всіх елементів сітки водозбору.
2. Параметри, для яких існують ґриди з відповідними значеннями.
3. Параметри, значення яких отримуються з ґридів у відповідності з певною класифікацією типів за принципом «значення елемента ґриду – значення параметра».

Перший тип характерний для випадків, коли параметр, у силу своїх фізичних особливостей, не змінюється для території водозбору або існує брак просторових даних для оцінки його мінливості. Значення таких параметрів, з певних міркувань, задаються дослідником у конфігураційних даних моделі.

До другого типу належать такі параметри, як висота елемента сітки, напрям руху води та будь-який інший, для якого існує цифрова карта.

До третього типу належать параметри, значення яких отримуються з певних карт класифікацій геоморфологічних чи гідрологічних властивостей території водозбору, таких як карта ґрунтів, карта рослинності, карта болот тощо. Такими параметрами є гідравлічна провідність ґрунту, коефіцієнт гідравлічної шорсткості поверхні та будь-який інший, для якого існує відповідність «тип у класифікації – значення».

Для другого та третього типів параметр визначається шляхом знаходження елемента ґриду, що відповідає географічним координатам елемента водозбору. Для уникнення невизначених ситуацій, коли одному елементу водозбору відповідає декілька можливих елементів вхідних ґридів, просторовий крок сітки водозбору має бути менший або дорівнювати просторовому кроку вхідних цифрових карт. Якщо ця умова не витримана, то вхідні ґриди приводяться до необхідного просторового кроку шляхом інтерполяції за процедурою кригінгу [1].

Технологія реалізована у вигляді програмного коду, написаного мовою програмування Python (www.python.org). Як вхідна інформація задаються текстові файли з таким набором даних:

- Перелік замикаючих створів з географічними координатами, де вказуються основний замикаючий ствір для побудови водозбору та довільна кількість замикаючих створів для знаходження відповідних підводозборів.
- Цифрові карти висот та напрямків руху води у форматі ASCII ESRI GRID.
- Конфігураційний файл з переліком та описом параметрів моделі (розд. 4), якими буде ініціалізовано водозбір.
- Цифрові карти у форматі ASCII ESRI GRID та їх класифікації типів, що будуть використовуватися для знаходження значень параметрів моделі водозбору.

Після проведення всіх процедур, описаних у попередніх розділах, структура даних, яка містить ініціалізований водозбір, записується у бінарному форматі на диск для подальшого використання програмою моделі ТОПКАПІ-ІПММС.

5. Приклад застосування розробленої ГІС-технології для водозбору р. Уж

Для побудови моделі стоку водозбору р.Уж з замикаючим створом гідрологічна станція в м. Ужгород (координати: 22,3° сх. довг., 48,7° пн. широти) з світової карти висот SRTM була отримана цифрова карта регіону (рис. 2 а,б). Просторовий крок карти дорівнює 90м. Згідно з методологією, викладеною в розд. 2, було побудовано грід напрямків руху води та визначено контур водозбору (рис. 2в). Розрахована площа водозбору дорівнює 1977 км². Це значення фактично дорівнює площі, яка фігурує в літературі з водних ресурсів України [12], а саме 1970 км². Цей факт дозволяє вважати процедуру ідентифікації контуру водозбору прийнятною для використання у моделюванні.

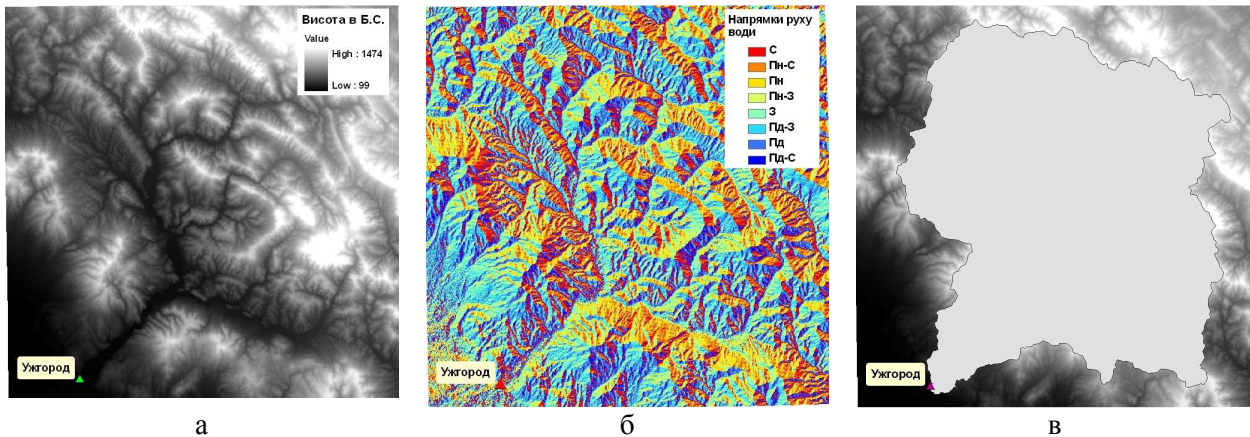


Рис. 2. ГІС-дані водозбору р.Уж: а) цифрова карта висот SRTM для регіону р.Уж; б) карта напрямків руху води; в) контур водозбору р. Уж з замикаючим створом у м. Ужгород

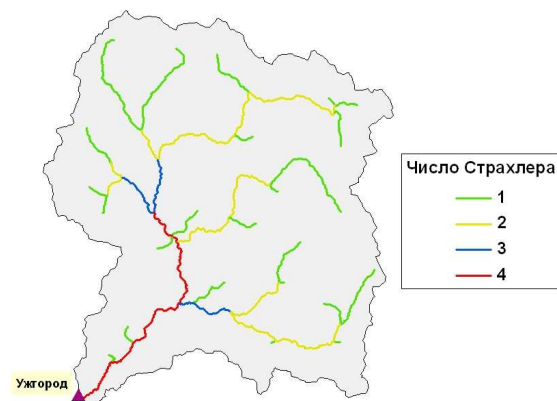


Рис. 3. Річкова мережа водозбору р. Уж та числа Страхлера

Для отримання річкової мережі водозбору були задані такі параметри: $A_{th}=1\%$ від загальної площі водозбору, $w_{max}=20\text{м}$ та $w_{min}=2\text{м}$. Використовуючи процедури, описані в розд. 3, була створена річкова мережа і отримані числа Страхлера для кожної з секцій водотоків (рис. 3).

Основними картами, що використовуються у моделі ТОПКАПІ-ІПММС для визначення параметрів, є карта рослинного покриву і землекористування та карта ґрунтів. Існує велика кількість карт цих класифікацій різного масштабу та покриття, що вільно розповсю-

джуються у всесвітній мережі інтернет.

Серед карт ґрунтів слід згадати про FAO-UNESCO Soil Map of the World [13], на базі якої, з урахуванням регіональних досліджень ґрунтів, у 2009 році було створено HWSD (Harmonized World Soil Database, <http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database>). Ці карти покривають весь світ, але просторовий крок карти FAO є 5км, а карти HWSD – 1км і мають 15773 класи ґрунтів. Оскільки карта HWSD є більш детальною, то саме вона використовується у моделі.

Як карта рослинного покриву і землекористування модель ТОПКАПІ-ІПММС використовує карту GlobCover Land Cover v.2 (<http://ionial.esrin.esa.int>), яка була створена ESA (European Space Agency) у 2008 році. Просторовий крок її дорівнює 300м, карта має 23 класифікації. Ця карта є більш детальною і має більшу кількість класифікацій у порівнянні з всесвітньо відомими картами, створеними у USGS (United States Geological Survey)

(<http://landcover.usgs.gov>) та UMD (University of Maryland) (<http://www.geog.umd.edu/landcover>).

З вищеназваних карт були побудовані відповідні карти для водозбору р. Уж (рис. 4). У табл. 1 наведено класи ґрунтів (у класифікації FAO та USGS) та рослинного покриву, що зустрічаються на території водозбору. Використовуючи процедуру, описану у розд. 4, для кожного елемента розрахункової сітки водозбору були присвоєні відповідні типи ґрунтів та рослинного покриву. В залежності від типу кожного елемента були отримані його параметри моделі. З карти ґрунтів, згідно з [14], отримуються значення коефіцієнта гідравлічної провідності, максимально можливий вміст води у шарі ґрунту та інші параметри модуля ґрунтового стоку. Карта рослинного покриву слугує джерелом знаходження значення коефіцієнта шорсткості поверхні для кожного елемента водозбору.

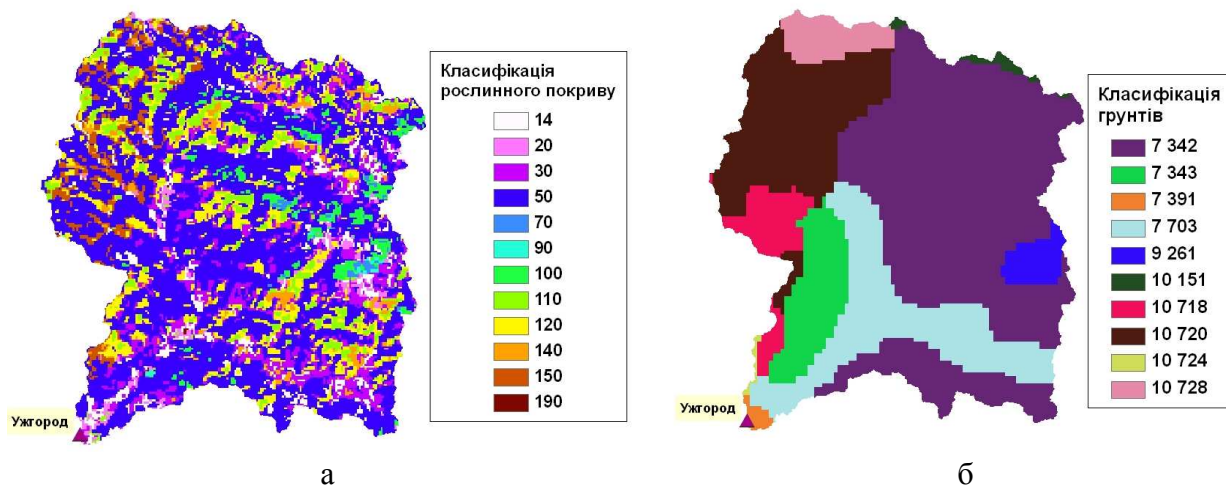


Рис. 1. Водозбір р. Уж: а) карта рослинного покриву; б) карта ґрунтів

Таблиця 1. Перелік типів ґрунтів та рослинного покриву

Рослинний покрив і землекористування		Карта ґрунтів		
Значення	Тлумачення	Значення	FAO	USGS
14	Незрошувані орні землі	7342	Dystric cambisols	Loam
20	Орні землі (50–70%) / трава/чагарники (20–50%)	7343	Dystric cambisols	Loam
30	Трава/чагарники (50–70%) / орні землі (20–50%)	7391	Gleyic Cambisols	Loam
50	Широколистяний ліс	7703	Eutric Podzoluvisols	Silt Loam
70	Хвойний вічнозелений ліс	9261	Umbric Leptosols	Loam
90	Змішаний хвойний вічнозелений та опадаючий ліс	10151	Dystric Cambisols	Loam
100	Змішаний хвойний та широколистяний ліс	10718	Eutric Cambisols	Loam
110	Ліс та чагарники (50–70%) / трава (20–50%)	10720	Dystric cambisols	Loam
120	Трава (50–70%) / ліс та чагарники (20–50%)	10724	Gleyic Luvisols	Loam
140	Луки	10728	Umbric Leptosols	Loam
150	Зріджена рослинність			
190	Урбанізована територія			

Для оцінки точності значень параметрів отримана модель була перевірена для осіннього паводку 1998 року і проведено порівняння розрахованих та вимірених витрат для

гідрологічної станції м. Ужгород та станції Жорнава, розташованої в верхів'ї водозбору (рис. 5).

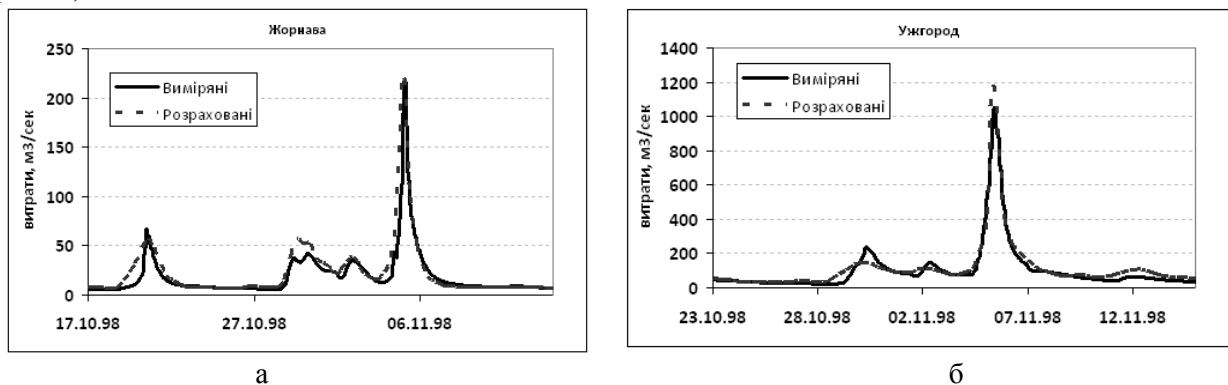


Рис. 2. Результати моделювання для водозбору р. Уж: а) гідрологічний пост с. Жорнава; б) гідрологічний пост м. Ужгород

Таблиця 2. Похибки результатів моделювання

Водозбір	Коефіцієнт детермінації, R^2	Співвідношення водного балансу, %
р. Уж, с.Жорнава	0,95	95
р. Уж, м. Ужгород	0,9	89

Отримані результати моделювання добре співпадають з даними вимірів (табл. 2). Запропонований метод обробки просторових даних дозволяє побудувати модель, яка адекватно описує процеси формування стоку.

6. Приклад застосування розробленої ГІС-технології для водозбору р. Стир

У цьому розділі стисло наведено результати застосування технології для водозбору правобережної притоки р. Прип'ять – р.Стир. На базі цифрової карти висот SRTM було ідентифіковано водозбір з замикаючим створом с. Зарічне, розташованого на кордоні з Білоруссю, і яке знаходиться майже в гирлі р. Стир, та два підводозбори з замикаючими створами с. Щурівці та м. Луцьк, що відповідають верхній та середній течіям р. Стир (рис. 6а).

Також була побудована річкова мережа водозбору і знайдені відповідні числа Страхлера для кожної з секцій річки та приток (рис. 6б).

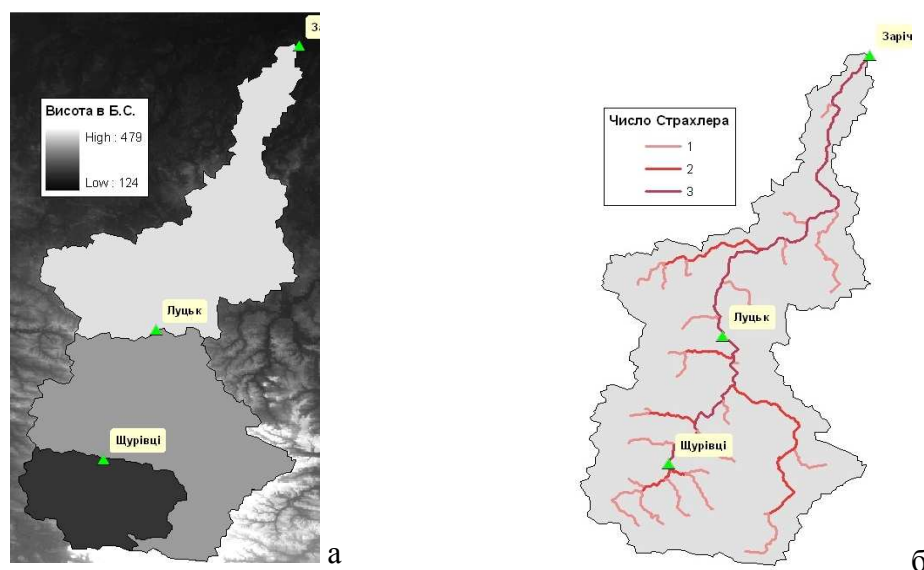


Рис. 3. ГІС-дані водозбору р. Стир: а) контури водозборів з замикаючими створами Щурівці, Луцьк, Зарічне; б) річкова мережа водозбору р. Стир та числа Страхлера

В результаті отримано площу водозбору 12 477 км², що фактично відповідає площі, вказаній у літературі [15], а саме 12 370 км².

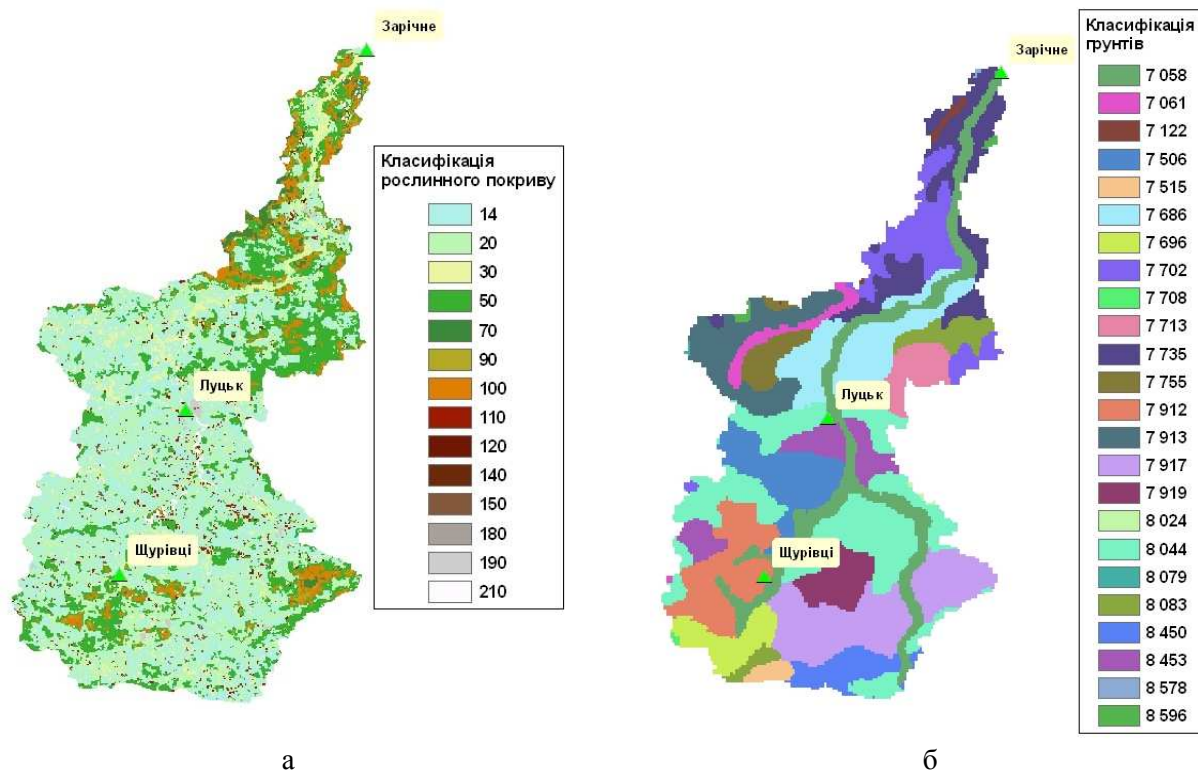


Рис. 7. Водозбір р. Стир: а) карта рослинного покриття; б) карта ґрунтів

Згідно з описаними вище процедурами, були отримані карти ґрунтів та рослинного покриття (рис. 7). Розшифровку класифікацій можна знайти у документації HWSD та GlobCover Land Cover v.2. На базі отриманих ґридів була параметризована модель ТОПКАПІ-ІПММС і для оцінки точності параметризації було проведено моделювання осіннього паводку 1974 року й виконано порівняння розрахованих та вимірних витрат для гідрологічної станції с. Щурівці (рис. 8).

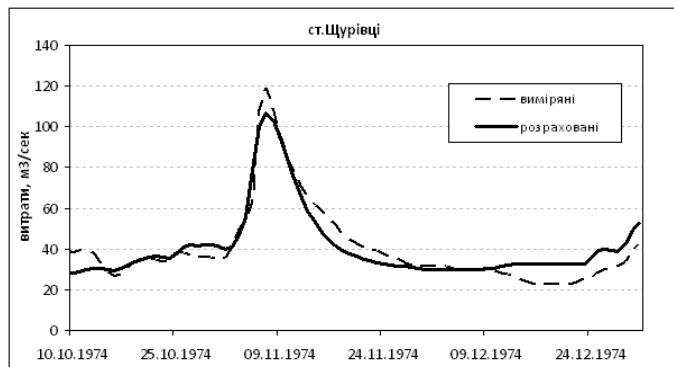


Рис. 8. Результати моделювання для водозбору р. Стир, гідрологічний пост с. Щурівці

водного балансу дорівнює 89%.

7. Висновки

Розроблена технологія обробки географічних та геоморфологічних просторових даних дозволяє визначити такі важливі гідрологічні характеристики, як контур водозбору та річкову мережу. Викладено підхід для асимілювання розподіленими моделями просторових даних будь-якої природи, що дозволяє використовувати їх для дослідження гідрологічних процесів на водозборі, також розроблено програмний код, що реалізує підхід.

Використовуючи світові карти ґрунтів і рослинного покриву та їх загальноєвропейські класифікації, технологія дозволяє ідентифікувати значення параметрів розподілених гідрологічних моделей для водозборів, що істотно зменшує складність їх калібрування. Технологія була використана для побудови розподіленої гідрологічної моделі ТОПКАПІ-ПММС і було проведено моделювання паводків на водозборах р. Уж і р. Стир.

Отримані результати продемонстрували ефективність розробленої технології обробки просторових даних у впровадженні сучасних розподілених гідрологічних моделей для водозборів України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Vieux B.E. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS / B.E. Vieux // Series: Water Science and Technology Library. – 2004. – Vol. 48. – 289 p.
2. Кучмент Л.С. Модели процессов формирования речного стока / Кучмент Л.С. – Л.: Гидрометеоздат., 1980. – 143 с.
3. An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Européen / M.B. Abbott, J.C., Bathurst, J.A. Cunge [et al.] // "SHE". 1 History and philosophy of a physically based distributed modelling system. Journal of Hydrology. – 1986. – N 87. – P. 45 – 59.
4. Wigmosta M.S. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain / M.S. Wigmosta, L. Vail, D.P. Lettenmaier // Water Resources Research. – 1994. – Vol. 30. – P. 1665 – 1679.
5. Бойко О.В. Оцінка ефективності протипаводкових заходів на малих річкових водозборах Закарпаття на основі розрахунків розподіленої моделі «опади-стік» / О.В. Бойко, М.Й. Железняк // Математичні машини і системи. – 2011. – № 4. – С. 149 – 160.
6. Иванов В.А. Гидравлическая модель водной системы Украины / В.А. Иванов, А.В. Прусов // Доп. НАН України. – 2004. – № 9. – С. 119 – 125.
7. Tarboton D.G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models / D.G. Tarboton // Water Resources Research. – 1997. – Vol. 33(2). – P. 309 – 319.
8. Иванов В.А. Автоматизированный поиск направлений водных потоков по данным цифровых моделей рельефа / В.А. Иванов, А.В. Прусов // Доп. НАН України. – 2006. – № 11. – С. 165 – 171.
9. Todini E. The TOPKAPI model / E. Todini, L. Ciapapica // Mathematical Models of Large Watershed Hydrology / V.P. Singh [et al.] (ed.). – Colorado: Water Resources Publications, Littleton, 2001. – Chapter 12. – P. 471 – 504.
10. Jenson S.K. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis / S.K. Jenson, J.O. Domingue // Photogramm. Eng. Remote Sens. – 1988. – Vol. 54 (11). – P. 1593 – 1600.
11. Drozdek A. Data Structures and Algorithms in C++ / Drozdek A. // Brooks and Cole. Pacific Grove, CA. – LA, 2001. – 511 p.
12. Strahler A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology / A.N. Strahler // Transactions of the American Geophysical Union. – 1957. – Vol. 8 (6). – P. 913 – 920.
13. FAO/UNESCO/ISRIC. Revised Legend of the Soil Map of the World // World Soil Resources Report, FAO. – Rome, Italy, 1990. – 119 p.
14. Brooks R.H. Hydraulic properties of porous media / R.H. Brooks, A.T. Corey // Hydrol. Pap. 3. Colo. State Univ., Fort Collins. – Denver, 1978. – 27 p.
15. Паламарчук М.М. Водний фонд України: довідк. посібн. / М.М. Паламарчук, Н.Б. Закорчевна; за ред. В.М. Хорєва, К.А. Алієва. – К.: Ніка-Центр, 2001. – 392 с.

Стаття надійшла до редакції 27.12.2011