

УДК 551.4:911.1

І.Г. Черваньов,
С.В. Костріков

ГІДРОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС НА ВОДОЗБОРІ: АЛГОРИТМИ СТРУКТУРНО- ЦИФРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна,
г. Харків, Україна

Анотація. Запропоновано ряд алгоритмів маршрутизації гідрологічного стоку первинних ложбин за цифровою моделлю рельєфу. Верифіковано й реалізовано процедури моделювання гідролого-геоморфологічного процесу на річкових та яружно-балкових водозборах.

Ключові слова: Гідролого-геоморфологічний процес, маршрутизація стоку, алгоритм, ГІС.

Вступ. Низка наукових напрямів і практичних реалізацій заходів регулювання поверхневого стоку, протиерозійного захисту земель, геоекологічного прогнозування в умовах флювіального рельєфу, що має переважаюче місце серед природних ландшафтів помірного поясу суходолу, спираються на два фундаментальні поняття: водозбор як структурована частка території, що є організуючою ланкою просторової організації земної поверхні, та поверхневий стік – основний активно й постійно діючий агент перетворення рельєфу цієї території. Проблема дослідження цих явищ та наукових понять, що їх відображують, присвячена величезна література, котру неможливо охопити у будь-якій окремій статті. Назвемо лише ключові дослідження й наукові школи. Це, перш за все, відомі у світі праці А.Абрахамса (A.Abrahams), А. Ховарда (A.Howard), Р. Хортон, А.Шейдеггера, що стали хрестоматійними, тому не потребують бібліографічних посилань. Велика частка фундаментальних студій та узагальнень на теренах СРСР належить ушлявленій школі М.І.Маккавеева, котрий особисто дослідив теоретичні аспекти таких об'єктів та створив лабораторію експериментальної геоморфології Московського університету, науковим керівником котрої натеper є Р.С.Чалов, де уперше було поставлено відповідні дослідження.

У науково-організаційному відношенні, слід звернути увагу на існування й діяльність Міжвузівської науково-координаційної ради з проблеми ерозійних, руслових та гірлових процесів, що існує більш ніж 2 десятиліття на базі Московського університету (у числі 48 колективних членів ради 3 класичні університети України). Ознайомлення з випусками праць цього науково-організаційної установи дає змогу проникнути у сферу відповідних досліджень у РФ та до деякої міри – у країнах СНД (напр., [1]).

В Україні до цього напрямку на стику гідрології та геоморфології тяжіють теоретичні дослідження Г.І.Швебса [2], О.О.Світличного з співавторами [3], експериментальні студії та узагальнення І.П.Ковальчука [3], конкретно-методичні роботи ерозієзнавців С.Ю.Булигіна та М.В.Куценка. Аналізові наукових знань та дослідницького апарату флювіальної геодинаміки та регіональних здобутків українських вчених присвячено більш ніж 60 стор. фундаментальної колективної монографії НАН України за редакцією В.П.Палієнко, де, зокрема, наведено оглядову карту інтенсивності розвитку ерозійних процесів у найкрупніших річкових басейнах України ([4], рис. 5.15). Отже, існує значний доробок у вивченні проблем геодинаміки та структурних наслідків флювіального процесу.

Натомість, у зв'язку проблемами дослідження комплексного гідролого-геоморфологічного процесу та з кричущою потребою переходу на комп'ютерне моделювання гідролого-геоморфологічного процесу за цифровими моделями рельєфу, виникає потреба у створенні алгоритмів і програм, котрі б, спираючись на відомі ГІС-платформи, давали змогу апаратної симуляції цього процесу. Остання має виключне значення для теоретичного прогресу на якісно новому рівні досліджень, бо створює умови для комп'ютерних експериментів на теоретично обґрунтованих моделях, з урахуванням у них критерії подібності, розмірностей тощо, як це властиве гідрологічним дослідженням,

але практично мало знане у теоретичній геоморфології. В той же час, цифрове моделювання передумов прискороного масопереносу дає змогу практичних розробок для забезпечення геоекологічної безпеки (зокрема, прогнозування повнів, яроутворення та зсувів).

Отже, проблема в цілому виглядає нагальною й значущою як в теоретичному, так і в практичному баченнях. У такому сенсі, їй присвячено статтю, автори котрої досліджують способи забезпечення відтворюваності структурної організації рельєфу за регулярною цифровою моделлю, котра в процесі моделювання перетворюється на структурну. Вона спирається на відомі теоретичні засади структурного аналізу рельєфу і продовжує попередні публікації авторів [6, 7], являючи собою їхнє логічне продовження.

Загальна постановка задачі виглядає такою. Існує можливість розглядати всю поверхню геоморфологічного ландшафту як мережу різномасштабних русел. Якщо умовно накласти на ландшафтну поверхню регулярну сітку-матрицю цифрової моделі місцевості (ЦММ), то можна припустити, що кожна чарунка матриці отримує прихід атмосферної вологи і кожна (за винятком найвищих топографічних відміток) – приток води поверхневого стоку, тобто має власну приходну частину водного балансу. Тоді сусідні чарунки поєднуються потоком. Його простежування, що є вельми складним дослідницьким заходом, ми називаємо *маршрутизацією поверхневого гідрологічного стоку*.

Механічне перетворення флювіального рельєфу відбувається завдяки існуванню джерел зовнішньої (по відношенню до рельєфу) енергії, а також під впливом фактора саморозвитку як визначальної умови процесу самоорганізації [8] .

Властивість *дисипативності рельєфу*, тобто його здатності зберігати й удосконалювати морфологічну структуру за рахунок притоку зовнішньої енергії тепловологопереносу, відображає зміст процесу флювіального рельєфоутворення і дозволяє об'єктивно виділення *геоморфосистем* як певних цілісних утворень, що сприймають зовнішню енергію як цілісність [2], оскільки функціонування останніх характеризується тими ж дисипативними процесами – саме утворенням, надходженням, переміщенням, накопиченням і виносом речовини й транзитом та трансформацією енергії. Певною мірою, *“саму суть геоморфології водно-ерозійних ландшафтів складає утворення і рух уламкового матеріалу”* (див. [2], с.177), що, звісно, відбувається разом із водними потоками. Для прослідковування цього процесу, за Г.І. Швобсом, слід виділити в ерозійному геокомплексі структуру (структурну мережу) – відображення морфологічного аспекту розвитку і функціонування – відображення динамічного аспекту розвитку.

Рельєф є одним із ведучих, “сильних” компонентів ландшафту, а СЛ являють собою ребра твердого каркасу місцевості, котрі зберігаються і набувають виразності завдяки тому, що диференціюють *флювіальний геоморфологічний процес*. Перерозподіляючи вплив зовнішніх факторів на природно-антропогенні комплекси (радіацію, опади тощо), мережа рельєфу виступає в якості диференціатора останніх на геофізичні (та геохімічні) ландшафти різного рангу. Елементи зовнішньої геометрії рельєфу визначають різні гіпсометричні рівні, якими каскадна ландшафтно-геохімічна система (КЛГС) [9] ділиться на ряд елементарних ЛГС.

Отже, структурна мережа деяким чином визначає структуру ландшафту, і геофізична контрастність та геохімічна неоднорідність елементарних ландшафтів створюється за рахунок переміщення твердого матеріалу і різноякісного елювіального процесу та міграції речовин по різних формах рельєфу. Цим же фактором обумовлена сполученість процесів, зазначених в назві цього підрозділу.

Поняття маршрутизації поверхневого гідрологічного стоку. Уявімо собі рух краплинки води, що впала на складну непроникну поверхню. Її шлях цією поверхнею є маршрутом, а спосіб прослідковування цього маршруту ми називаємо маршрутизацією. У математичному моделюванні такої ситуації є складності, незрозумілі, якщо споглядаєш дійсну поверхню. Вони виникають через те, що цифрова модель рельєфу зазвичай є регулярною, тобто побудованою таким чином, що точки моделі «не помічають» структуру мережу. За такої обставини, досить часто виникає спотвореність результату моделювання: якщо, наприклад, одна з найближчих точок знаходиться у суміжному водозборі відносно того, що моделюється, то є шанси отримати такий маршрут поверхневого стоку, котрий у природі є фізично неможливим. Отже, для того, щоб

уникнути такої ситуації, потрібно скласти такий алгоритм маршрутизації, котрий би запобігав спотворенню ліній стоку (надалі вони утворюють мережі стоку).

Якщо ж стік відбувається у реальних умовах (а не на штучній непроникній поверхні, що нездатна до розмиву), то додаються функції ерозії-акумуляції, котрі, як зрозуміло геоморфологові, також впливають на гідролого-геоморфологічний процес – власне, становлять його функціональну сутність. Подальша частина статті коротко розкриває ці проблеми.

Оригінальну модель маршрутизації гідрологічного стоку достатньо детально розглядалася С.В. Костріковим особисто та зі співавторами в ряді попередніх публікацій [10-15]. У середині 80-х рр. минулого сторіччя була запропонована так звана “функція акумуляції стоку” - ФАС (*drainage accumulation function* – англ.) **DAF**. Цей показник - “...оператор, який, використовуючи матрицю напрямків стоку (**A**), що була розрахована за матрицею висот (**Z**), і матрицю вагових значень площ (**W**), визначає результуючу матрицю (**R**) таким чином, що кожен елемент в **R** подає суму вагових значень всіх елементів матриці, стік із яких здійснюється в даний елемент” [16, с. 326]. У ті ж роки було здійснено ряд досліджень, що характеризують, з одного боку, структуру поверхневого стоку [17], з іншого – процеси масопереносу, що відбуваються у флювіальній мережі [18]. Узагальненням цих досліджень є монографія, де показано методологію і результати дослідження гідролого-геоморфологічного процесу на водозборах, що розглядаються як флювіальні геоморфосистеми [19].

У цій статті ми маємо обмежитися нерусловими та схиловими мережами. Це різномасштабні ландшафтні мережі первинного стоку, котрі найважче відтворюються як традиційними методами топографічної зйомки, але особливо спотворюються при цифровому моделюванні топографічної поверхні, якщо вона здійснюється механістично без застосування апарату і методів сучасної геоморфології. Ми зосередимося на можливостях покращення відображень первинного стоку, що стали можливими в комп’ютерну еру, спираючись на відомий нам світовий досвід (див. огляд у [5] та власні розробки авторів, котрі цією статтею черговий раз репрезентують Харківську геоморфологічну школу.

Безпосередня мета статті полягає у тому, щоб показати спосіб структуризації водозбору, для чого опрацювати алгоритми маршрутизації поверхневого гідрологічного стоку у водозборі, що працюють на основі цифрової моделі рельєфу і дозволяють відтворювати умови стоку.

Для послідовного відтворення флювіального рельєфу, поверхневого стоку і руслової мережі шляхом маршрутизації поверхневого гідрологічного стоку необхідно поетапно вирішити три задачі:

- 1) формального опису процесу маршрутизації стоку через математичну модель флювіального рельєфу;
- 2) евристичного моделювання стоку за цифровою моделлю рельєфу (ЦММ);
- 3) маршрутизації стоку за ЦМР водозбору для створення моделі, яка відображала би повну флювіальну мережу з урахуванням геоморфологічної гетерогенності, спричиненої розбіжностями первинної морфології поверхні, геологічної будови та ландшафтних особливостей схилів.
- 4) через змодельовані параметри мережі рельєфу можна вирішувати задачу формалізації опису неоднорідності гідрологічного режиму.

Матеріал і методи. У якості фактичного матеріалу, що використовувався виключно для ілюстрації можливостей відтворення гідролого-геоморфологічного процесу та відповідних побудов, що верифікують алгоритми, використовувались ЦМР двох ділянок рельєфу Криму – Карадазького гірського масиву та водозбору р. Чорна. У будь-якому іншому випадку дослідникові слід замінити цифрову модель рельєфу.

У якості методу моделювання використано оригінальний пакет *GIS-Module Ukrainian 1.5*, самостійно розроблений С.В.Костріковим (див. [6, 14.15]). Для повного відтворення процедури моделювання гідролого-геоморфологічного процесу потрібно володіти цим пакетом.

Натомість, наведені алгоритми можна реалізувати, вочевидь, певним іншим способом, що було б, додамо, корисним для незалежного порівняння результатів.

Постановка задачі. Математична модель флювіального рельєфу не може використовуватися в середовищі ГІС сама по собі, а має бути зв’язана із базою даних (БД)

і базою знань (БЗ) геоінформаційної системи. Головною перешкодою до організації відповідної БД дотепер можна було вважати саме відсутність строгих формалізованих алгоритмів виділення мереж флювіального рельєфу по ЦМР *регулярного* типу (сітка висот заданого кроку). Авторами запропоновані такі алгоритми і приведені конкретні приклади їхньої роботи на *матриці гідрологічного процесу*. Водночас, робота цих алгоритмів передбачає формування відповідної БД ГС у такому розумінні, як це викладалося в деяких із наших попередніх публікацій (див. [6,7, 15]).

Основні визначення і математична постановка задачі. Такими є наступні. Вважаємо територію, яка подається через ЦМР, *ареною флювіального рельєфоутворення*. Нехай G - деяка замкнута область даних на ЦМР, а ∂G - її границя, і на області G задана деяка функція $Z=Z(x, y)(x, y \in G)$, $Z \in C^1$. Назвемо функцію $Zr(0)$ *функцією флювіального рельєфоутворення* (ФФРУ), якщо задовольняються три наступні вимоги:

$$1) \forall (x, y) \in G: \left\{ \frac{\partial Z(x, y)}{\partial x} = 0, \frac{\partial Z(x, y)}{\partial y} = 0 \right\} \Rightarrow \forall \varepsilon > 0 \quad (1)$$

$$\forall (x^0, y^0) \in V_\varepsilon(x, y)$$

$$Z(x^0, y^0) < Z(x, y), \text{ де } V_\varepsilon - \varepsilon\text{- околиці точки } (x, y)$$

$$2) \exists!(x_M, y_M) \in \partial G : Z(x_M, y_M) < Z(x, y) \forall (x, y) \in G \quad (2)$$

3) Можна побудувати рекурентну послідовність радіус-векторів у вигляді:

$$\vec{P}_k = \vec{P}_{k-1} - \varepsilon \vec{Q}_{k+1} \quad \vec{P}_0 = (x_0, y_0) \in G, \quad \vec{q}_k = \text{grad}(Z(x_k, y_k)) \quad (3)$$

$$\text{Тоді} \quad \lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ k \rightarrow \infty}} \vec{P}_k = P_M \quad \vec{P}_M = (x_M, y_M), \quad \forall (x_0, y_0) \in G \quad (4)$$

1) умова – рівняння (1) - означає, що $r(0)$ – функція ФФРУ, яка не може мати локальних мінімумів, і кожен її екстремум є максимумом.

2) умова – рівняння (2) - полягає в єдиності глобального мінімуму функції $Z(x, y)$ в області G і досягненні його на границі області ∂G .

3) умова – рівняння (3) і (4) - утверджує факт з'єднання всіх градієнтних ліній у єдиній точці мінімуму. Фактично приведені визначення є одним з можливих визначень для топографічної компоненти гідролого-геоморфологічної системи водозбору (ГГСВ).

Назвемо деяку функцію $Z'(x, y)(x, y) \in G$, $r(S, Z(x, y))$ функцією класу ФФРУ, якщо знайдеться така $r(0)$ – ФФРУ-функція $Z(x, y)(x, y) \in G$, що $S(Z(x, y) - Z'(x, y))/dx dy < S$. Очевидно, що перевірка на три приведені вище умови визначає міру відхилення деякої функції Z' від $r(0)$ – ФФРУ. Припустимо, що цю міру відхилення взагалі описує значення S . Очевидно також, що в кожній області можна побудувати будь-яку кількість $r(0)$ – ФФРУ-функцій. (Наприклад, усі строго монотонні функції двох перемінних $r(0)$ – саме такі функції).

З останнього твердження випливає, що, говорячи взагалі, достатньо легко для будь-якої $Z(x, y)$ побудувати $r(S, Z(x, y))$ - *флювіальну функцію* на G , якщо вибрати S досить великим. Для цього, наприклад, можна взяти будь-яку строго монотонну функцію на G , у якої мінімальне значення збігається з максимальним для функції $Z(x, y)$. Питання, однак, полягає в тому, щоб підібрати S мінімальним із усіх можливих значень. Фактично мова йде про позбавлення шуканої функції локальних екстремумів, тому що невиконання умов 2) або 3) при відповідності умові 1) означає, що область G можна розбити на декілька незалежних підобластей, на кожній з яких функція Z' виявиться $r(0)$ – функцією ФФРУ.

Зв'язок із реальною топографічною поверхнею може бути встановлений, і перехід до моделі, адекватної ЦМР, може бути здійснений наступним чином. При обробці даних про рельєф, знятих з топографічної карти, як правило, стикаємося із суттєвою «зашумленістю» даних (похибки зйомки та проведення горизонталей; вплив інших

факторів – забудови, залісення тощо). Останнє також зв'язане з цілим рядом обставин суто технічної підготовки інформації, з яких найбільш важливими є наступні:

- 1) на дрібномасштабних картах викривлення є наслідком невдалих генералізацій;
- 2) при знятті з будь-якої карти інформації з дискретним кроком виникає неминуча втрата точності;
- 3) помилки є результатом часткового застосування ручних і напівавтоматизованих методів.

Дані, що описують реальну топографічну поверхню річкового басейну подаються у вигляді деякої сіткової функції $[Z_H]G$, де H – крок зняття інформації, або – та ж сама чарунка ЦМР, про яку йшлося вище.

Через зазначене, функція Z_H рідко буває $r(0)$ – функцією класу ФФРУ, натомість, часто містить цілий ряд локальних екстремумів. Разом з тим, для визначення, припустимо, умовних «ліній стоку» необхідно домогтися $r(0)$ – відповідності функції Z_H , тому що в супротивному випадку (через невиконання умови **3**) (рівняння (3), (4) - картина маршрутизованого стоку буде істотно перекручена.

Таким чином, вихідним кроком обробки реальних даних є визначення підобластей відхилення функції $[Z_H]G$ від $r(0)$ – функції ФФРУ.

Алгоритми. Математична модель флювіального рельєфу – це формалізований опис систематизованої сукупності природних об'єктів (форм і елементів рельєфу), процесів (рельєфоутворення) і явищ (перш за все – гідрологічних) із допомогою необхідної математичної символіки. Зауважимо, що математичний апарат, який подається в цьому параграфі, взагалі відповідає умовам детерміністських моделей.

Далі ми викладаємо *шість оригінальних алгоритмів*, які, власне, і складають реалізацію математичної моделі флювіального рельєфу на матриці гідрологічного процесу. Ця математична модель флювіального рельєфу є розвитком напрямку автоматизованого моделювання, який вже достатньо давно заснував один із співавторів цієї книги – Б.Н. Воробйов [152]. Вказаний напрямок став однією із найважливіших передумов всієї сучасної методології геоінформаційного моделювання.

Пропонується *шість послідовних алгоритмів* формалізованого подання процесу рельєфоутворення тільки у вигляді заголовків їх окремих кроків.

Перший алгоритм перетворення первинної сіткової функції $[Z_H]G$ до $r(0)$ – функції ФФРУ виглядає наступним чином:

Крок 1. [Установити усі вузли, що стікають “самі в себе”, тобто локальні мінімуми функції $[Z_H]G$].

Крок 2. [Вияв локальних екстремумів].

Крок 3. [Відтворення ліній гідрологічного стоку – елементів мережі]. Кожна чарунка МГП після виконання *алгоритму 1* містить число ліній стоків, що проходять через неї.

Наступним кроком обробки інформації є побудова зв'язних деревоподібних флювіальних мереж, що потім будуть основою для формування бази даних. Побудова цих структур здійснюється на базі сформованих за допомогою *алгоритму 1* матриці гідрологічного процесу, як ці матриці подаються у попередньому розділі роботи. Кожен елемент матриці гідрологічного процесу належить до однієї із *чотирьох груп* – або вищих, або нижчих відміток, або до чарунок із напрямками стоку, або до чарунок із напрямками стоку на плоских ділянках [9, с. 33]. Кожний елемент флювіальної мережі, що була сформована, вважається елементом так званої “*спискової ерозійної структури*” [15], і в такому значенні повинен містити координати будь-якої описуваної точки елементу мережі, її амплітуду, посилання на топологічно сусідні точки цієї флювіальної мережі, а також на лінійний список, що описує границю водозбору в даному елементарному створі (який замикає водозбір на даній матриці гідрологічного процесу).

Другий алгоритм виконує побудову спискових деревоподібних флювіальних мереж.

Крок 1. [Початкові установки].

Крок 2. [Побудова елементу мережі].

Крок 3. [Звертання до стеку].

Крок 4. [Обробка матриці гідрологічного процесу].

Крок 5. [Зв'язок окремих ерозійних структур (загальний список)].

У результаті роботи *алгоритму 2* отримана спискова флювіальна мережа досліджуваної ділянки. Наступним кроком є порядкове бонітування елементів побудованої мережі.

Третій алгоритм стосується встановлення порядків елементів флювіальної мережі.

Крок 1. [Початкові установки].

Крок 2. [Аналіз поточного блоку].

Крок 3. [Обхід мережі за принципом “переміщення вліво”].

Крок 4. [Звертання до стеку].

Крок 5. [Визначення порядку точки флювіальної мережі, або вузла злиття її елементів].

Отже, порядки виділеної флювіальної мережі встановлені, і є її повна інформаційна картина. Тепер необхідно для кожного незалежного тальвегу виділити границю його водозбірної басейну. Тим самим кожен басейн виявиться описаним, незалежно від інших, своїми головним руслом і границею, тобто отримано логічний елемент бази даних.

Четвертий алгоритм виконує виділення й упорядкування границі елементарного водозбірної басейну.

Крок 1. [Виділення площі басейну].

Крок 2. [Визначення точок границі].

Крок 3. [Упорядкування виділеної границі].

Крок 4. [Уточнення границі].

На цьому положення границі водозбору вважається визначеним. Тепер, скориставшись **алгоритмом 4**, необхідно встановити границю для всієї флювіально-ерозійної мережі.

П'ятий алгоритм відповідає за встановлення границь субводозборів порядку вищого аніж елементарний водозбірний басейн.

Крок 1. [Початкова обробка].

Крок 2. [Визначення гирлової точки незалежного водозбору].

Крок 3 [Звертання до стеку].

Таким чином, отримана повна інформаційна структура, що описує флювіальні мережі розглянутої ділянки топографічної поверхні. Ці змодельовані в математичній моделі флювіального рельєфу мережі будуть еквівалентні природним русловим мережам і границям їхніх водозбірних басейнів у тому випадку, якщо *правильно* як первинна ділянка обраний певний водозбірний басейн – *елементарний водозбір*, який у крайньому випадку відповідатиме тільки одній стільниковій чарунці ЦМР. Останньою логічною підмножиною бази даних, яка формується, є сукупність особливих точок і ліній на рельєфі, що не відносяться до структурного каркаса рельєфу. У першу чергу, це ділянки кожного незалежного водозбору, що перетерпіли зміни в процесі роботи **алгоритму 1**, тобто поверхня даного водозбору була приведена до **$r(0)$** – вигляду флювіального рельєфоутворення.

Шостий (і останній в цьому ряду) **алгоритм** забезпечує визначення особливих областей відхилення від властивостей, притаманних топографічній поверхні **$r(0)$** – вигляду флювіального рельєфоутворення, умовно – “області ФФРУ”.

Процедуру розрахунку функції акумуляції стоку можна пояснити наступним чином. Кожний елемент матриці може приймати значення **1** або **0**. Якщо кожному елементу в матриці **W** поставити у відповідність площу одиничної чарунки матриці **A** (тобто $= 1$), то кожний елемент матриці **R** буде подавати відповідну частину загальної *водозбірної* площі, яку складають всі елементи матриці. Далі відображався вплив підстелючої гірської породи. Якщо всім елементам матриці **W**, які відповідають певним гірським породам, поставити у відповідність **1**, а решті - **0**, то матриця **R** продемонструє просторовий розподіл певного типу гірської породи, поверхнею якої відбувається стік, що відображається матрицею **A**. Коли тільки декільком елементам в матриці **W** поставлені у відповідність одиничні площі, а решта елементів дорівнює нулеві, то всі ці елементи, що мають значення **1**, визначають шлях (маршрутизацію) руслового стоку по елементах матриці до нижнього базису ерозії

Для уточнення значення функції акумуляції стоку **D** слід застосовувати методи просторово-статистичного аналізу залежності між показником сумарної довжини лінійних флювіальних форм на одиницю площі і відносною висотою рельєфу. Зіставляються дві матриці - значень сумарної довжини лінійних форм рельєфу на одиницю площі і відносною висоти рельєфу (місцевих базисів ерозії). Дослідження кореляційного зв'язку між елементами двох матриць надалі дає можливість враховувати додаткові корегуючі коефіцієнти у розрахунку функції акумуляції стоку **D** через базовий алгоритм стоку [15].

Моделювання ландшафтної мережі первинного стоку, що будується на підставі функції акумуляції стоку **D**, може бути підсумоване у наступному вигляді:

1. Розрахунок матриці напрямків стоку (A) на підставі матриці абсолютних висот (Z) і іншої доступної інформації щодо земної поверхні на даній території.

2. Впровадження алгоритму підрахунку функції акумуляції стоку $D(A, W)$ для того, щоб отримати матрицю одиничних водозбірних площ R .

3. Визначення придатної матриці вагових значень площ (W) і інтерпретація результуючої матриці (R) для встановлення характеру особливостей місцевої ландшафтної мережі первинного стоку, тобто встановлення особливостей поверхневого стоку.

Фактично моделі ландшафтної мережі первинного стоку відповідає алгоритм визначення флювіального рельєфу і течії на ньому гідрологічних процесів, який розробляється і подається через формалізовану математичну модель.

Таким чином, найсуттєвіших компоненти, що подають гідролого-геоморфологічну систему водозбору, адекватно моделюються через подану формалізовану математичну модель флювіального рельєфу. Це, по-перше, флювіальна мережа, по-друге, границі водозбірних басейнів – вододіли і, по-третє – “особливі точки” рельєфу. Інформація щодо результатів моделювання організується в БД ГІС відповідно до принципів, викладених нами раніше.

На жаль, викладений вище спосіб приведення функції до $r(0)$ – “області ФФРУ” досить часто не реалізується на практиці, тому що алгоритм 1 погано сходиться для більшості реальних топографічних поверхонь складної флювіальної структури. У цьому випадку, на відміну від алгоритмів формалізованої математичної моделі флювіального рельєфу необхідно використовувати ряд алгоритмів *маршрутизації гідрологічного стоку по ЦММ* – евристичних алгоритмів іншого класу (див. [5]).

Маршрутизація гідрологічного стоку за ЦМР водозбору. Маршрутизація гідрологічного стоку за ЦМР достатньо детально викладалася в наших кількох попередніх публікаціях, наведених вище. Ця процедура може вважатися базовим кроком розробки моделі гідролого-геоморфологічної системи водозбору, оскільки безпосередньо генерує три шари необхідних даних для такого моделювання:

1) ЦМР із штучно заповненими зниженнями – “порожнинами”, які відбивають, насамперед, помилки у початкових даних (такі об’єкти, між іншим, згадувалися і стосовно математичної моделі флювіального рельєфу у попередньому підрозділі;

2) шар даних, який відбиває напрямки поверхневого стоку для кожної чарунки ЦММ;

3) шар даних щодо значення акумуляції стоку для кожної чарунки, яке буде дорівнювати сумарному числу інших чарунок, стік з яких потрапляє до вказаної чарунки. Таке евристичне моделювання на ЦМР відповідає роботі *1-го алгоритму* перетворення первинної сіткової функції $[Z_n]G$ до $r(0)$ – функції ФФРУ при формалізованому моделюванні флювіального рельєфу.

ЦМР водозбору (ЦМРВ) нами подається в якості топографічного шару ГІС-моделі річкового басейну, що є підвалиною всієї пошарової побудови цієї модельної конструкції. Застосовано визначення повної маршруту часточки води у флювіальній мережі імітуючи “рух води донизу”. Зазначимо, що цей алгоритм виконується вже не на ЦМР, а на ЦМРВ.

Зроблена нами і викладена в попередніх публікаціях модифікація алгоритму маршрутизації стоку передбачала використання понять характеристик *моментального геоморфологічного гідрографу* (МГГ) [15]. Поняття МГГ характеризує миттєвий розподіл рельєфоутворюючих (низької забезпеченості) витрат води по поверхні водозбору у його межах.

Оскільки найбільш значущий вплив гідрологічного режиму на геоморфологічні процеси у водозборі спостерігаються протягом водопілля, то головні характеристики гідрографу водопілля (величини максимальних витрат у період підняття води – Q_{MB} та тривалість цього періоду – T_{MB}) повинні розглядатися як сукупність характеристик низки МГГ. Обидві вказані характеристики (Q_{MB} , T_{MB}) нами використовувалися при маршрутизації стоку по топографічному шару геоінформаційної моделі водозбору. Зрозуміло, що у цьому випадку беруться до уваги обидва зазначені раніше – узагальнюючий і частковий – параметри моделювання водозбору – *морфологія його поверхні і мережа рельєфу*.

Загальний алгоритм визначення повної флювіальної мережі у графічному вигляді можна представити за наступною схемою (рис. 1). Три головні блоки, із котрими зв’язані всі процеси і лінії шляхів виконання роботи алгоритму, це – 1) ЦММ, 2) ММ ФР та 3) ЦМРВ. Низхідні і висхідні лінії шляхів виконання поєднують ММ ФР із ЦММ, оскільки саме

“області перевірки на $r(0)$ функцію ФФРУ” – це частини масиву ЦММ. Такі ж саме лінії шляхів виконання вказують на взаємний зв'язок між ММ ФР і ЦМРВ – формалізоване подання флювіального рельєфу має узгоджуватися із його евристичним моделюванням. ЦММ зв'язана із ЦМРВ тільки низхідною лінією шляхів виконання, оскільки модель рельєфу водозбору вже ніяким чином не може мати зворотного впливу на первинну ЦММ, а головним процесом перетворення останньою в ЦМРВ на цій лінії шляху виконання буде “ліквідація знижень-порожнин”.

Головним процесом *нисхідної лінії шляхів виконання* від ММ ФР до ЦМРВ буде виконання *алгоритмів 1-6*, що викладалися вище. *Висхідна лінія* від ЦМРВ до ММ ФР передає, які необхідно зробити уточнення у формалізований опис флювіального рельєфу в залежності від поточних результатів евристичного моделювання. Процедура маршрутизації по ЦМРВ виконує свій заключний крок при досягненні граничної умови акумуляції стоку по чарунках ЦММ.

Коротко зупинимося на окремих блоках роботи алгоритму визначення повної флювіальної мережі та проілюструємо їх прикладом із авторського програмного забезпечення *GIS-Module Ukrainian 1.5*, вже поданого в наших попередніх публікаціях (див. [6, 14]).

Отже, перш за все заповнюються замкнуті зниження в масиві ЦММ. Потім виключаються з розгляду великі плоскі ділянки. Якщо задане *автоматичне* визначення точок стоку, обчислення проводяться за одне звертання до відповідної програми. При *інтерактивному* виборі точок стоку (вручну) при першому звертанні визначаються такі точки, і повернення в меню дає користувачеві програмного забезпечення можливість корегувати набір точок стоку за межі масиву ЦММ і даної ЦМРВ.

При альтернативному інтерактивному – *автоматизованому* - визначенні точок стоку побудова флювіальної мережі проводиться в два етапи (блок *Виділити ерозійну і руслову мережу* – рис. 1): на першому етапі флювіальна мережа будується на базі всіх наявних точок стоку.

Після цього проводиться аналіз загальної схеми стоку, на підставі якого деякі з точок стоку відкидаються, і проводиться побудова мережі на нових даних.

Потім впроваджується виділення річкових басейнів (блок *Виділити великі басейни і субводозбори по ЦМРВ*), але це виконується на іншій лінії шляху виконання алгоритму. Безпосередньо виділення точок стоку проводиться наступним чином (блок *Виділити ерозійну і руслову мережу*): для *флювіального рельєфу* передбачається, що для такого рельєфу точками стоку можуть бути тільки граничні точки області; у випадку *нефлювіального рельєфу* точками стоку можуть бути як граничні точки області, так і внутрішні. Попередньо проводиться згладжування сітки висот ЦММ методом “ковзного вікна” (ширина рамки $id = 0.02 * \min(nx, ny)$, але не менше 2). Вже із того, що викладено, має бути зрозумілим, що загальний алгоритм складається із *кількох внутрішніх* (наприклад, розглянуті вище *алгоритми 1-6* формалізованої математичної моделі). Внутрішній алгоритм побудови флювіальної мережі вказаного блоку є тільки одним з них, який займає ключове місце. Мається набір точок стоку, які у сукупності складають певний водозбірний басейн.

У процесі побудови флювіальної мережі імітується повінь, тобто визначається послідовність розповсюдження “зони повені” по поверхні водозбору. Оскільки при цьому “псується” матриця висот, перед початком роботи ці дані зберігаються, а потім відновлюються колишні значення поля висот.

Головним параметром алгоритму є крок “поширення зони повені” (dh) *fp->step_flow*. Розрахунок виконується крок за кроком починаючи із мінімального значення висоти.

Вузловим моментом процедури побудови мережі є операція // *Flowing the neighbours points*. Тут переглядаються всі сусідні точки, з них виділяються ті, що підлягають попаданню до “зони повені” на даному кроці, тобто приналежні області і висоти, що мають значення, менше поточного рівня (hh). Такі точки відзначаються як ті, що стікають у дану, і записуються в робочий масив. При цьому потрібно вжити заходів щоб діагональні лінії ерозійної (флювіальної) мережі не перетиналися. Масив сусідніх точок, що стікають у дану, сортується по відхиленнях висоти від поточного рівня.

Перша з цих точок стає поточною точкою стоку для даного басейну, інші містяться в стек даного басейну (субводозбору).

Якщо точок, звідки у дану є стік, немає, поточною для цього басейну стає точка з його стека і робота продовжується з цим басейном, при порожньому стеку– відбувається перехід до наступного басейну.

Якщо після закінчення циклу по басейнах у якому-небудь зі стеків є точки, які не використані, весь цикл повторюється. Таким чином, робота внутрішнього алгоритму буде закінчена, коли ні для якого з басейнів не залишиться точок, що підлягають “затопленню” на даному кроці.

По визначеній флювіальній мережі оцінюються площі водозбору для кожної точки стоку. Спочатку проводиться вибракування точок стоку з малою площею водозбору. Якщо точки стоку задавалися інтерактивно, на цьому робота закінчується.

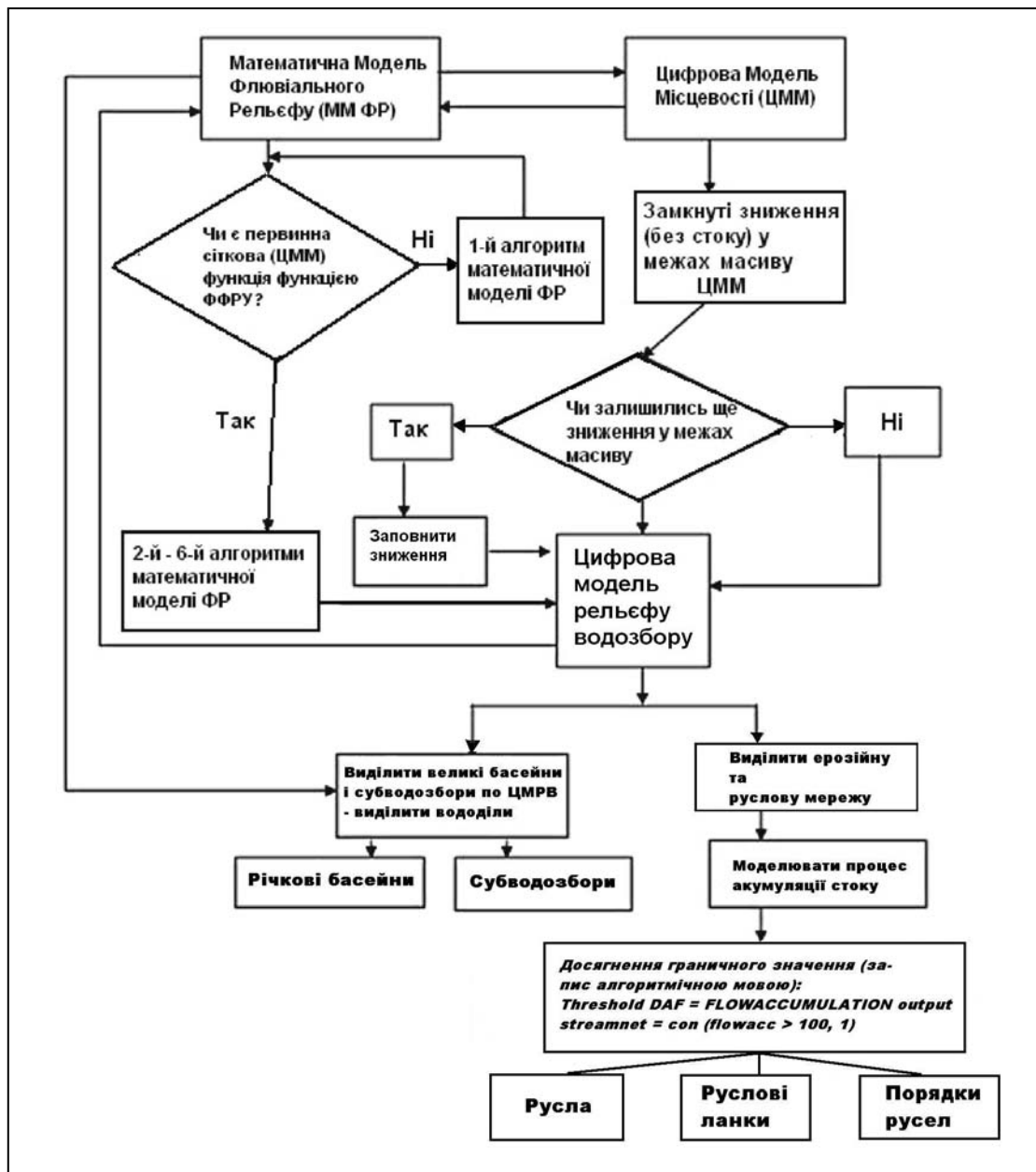


Рис. 1. Загальний алгоритм визначення повної флювіальної мережі із застосуванням складових системи GIS-Module Ukrainian 1.5: Математичної Моделі Флювіального Рельєфу, Цифрової Моделі Місцевості і Цифрової Моделі Рельєфу Водозбору

При автоматичному визначенні точок стоку для кожної із них проводиться обхід дерева флювіальної мережі, у процесі якого підраховується число “правильних” і “неправильних” ланок (у “правильних” ланках значення висоти зменшується в напрямку стоку, у “неправильних” - навпаки). Якщо число “неправильних” ланок у дереві даної точки стоку перевищує 1/20 числа “правильних” - така точка відкидається. Нарешті, буде отримана кінцева картина маршрутизованого стоку.

В рамках подальшої розробки геоінформаційних моделей можна створювати *функціональні моделі тривимірних мереж флювіальних геоморфосистем*, які вже згадувалися в наших попередніх публікаціях стосовно функціонально-геоморфологічного моделювання в середовищі системи автоматизованої обробки просторової інформації *Amber iQ* (див. [6]).

Схожими засобами розробки таких моделей володіє й наш авторський програмний продукт *GIS-Module Ukrainian 1.5*, який вже згадувався вище. У продовження саме тих кроків моделювання, що подавалися вище, створювалася модель тривимірної мережі ФГМС всього водозбірного басейну р. Чорна у південно-західному Криму. Відповідна ілюстрація подається на *рис. 2*.

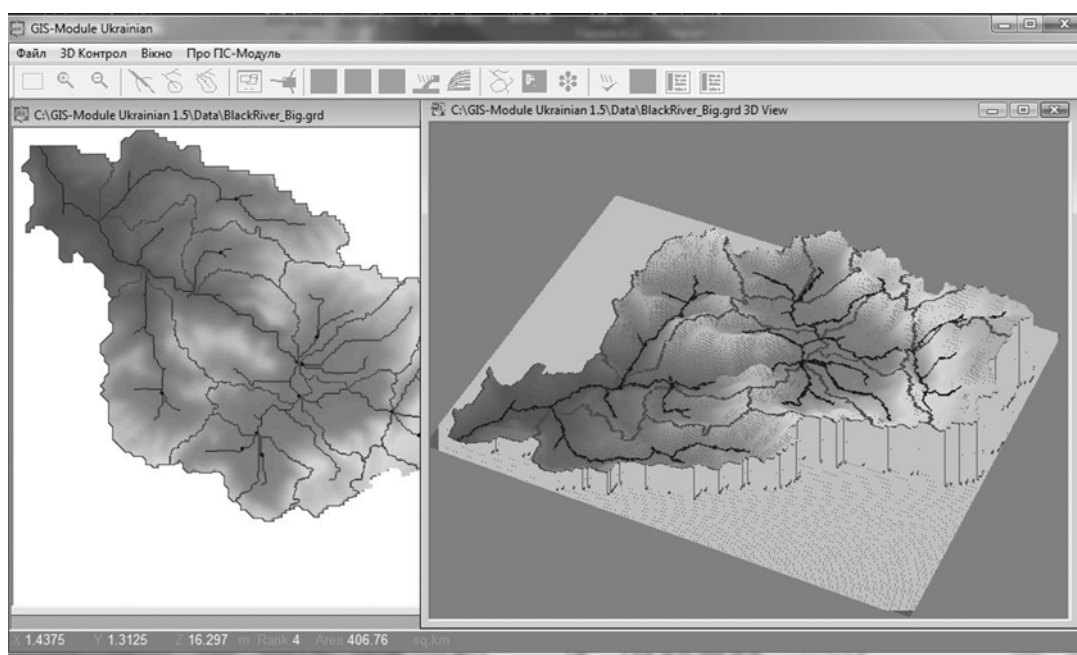


Рис. 2. Плошка та тривимірна мережа флювіальної геоморфосистеми водозбору р. Чорна (Південно-Західний Крим). Оригінальне зображення кольорове, тому на чорно-білій копії, нажаль, не розрізняються автоматично виплічені межі флювіальних басейнів та тальвеги

Результати та їх обговорення.

Виходячи з припущення, що підтверджується широким досвідом гідролого-геоморфологічних досліджень, буцімто групи властивостей структурної мережі рельєфу відображають по суті різні сторони активності рельєфу, авторами був розроблений спосіб їх відображення. через *індексацію показників топологічних і метричних властивостей мережі рельєфу*.

Показано, що серед моделей флювіальних мереж із групами властивостей останніх, які спрямовані на подальше відтворення структурної мережі рельєфу, доцільно виділяти і окремо розглядати 1) моделі руслових мереж, 2) моделі вододільних мереж і 3) моделі ландшафтних мереж первинного стоку. Саме визначення структурної мережі із її характерними властивостями – необхідна і, в переважній більшості випадків, достатня умова реалізації системного підходу до вивчення флювіального рельєфу.

Доведено, що для послідовного відтворення флювіального рельєфу, поверхневого стоку і руслової мережі доцільно поетапно вирішувати три задачі:

1) *формального опису процесу маршрутизації стоку* через математичну модель флювіального рельєфу – функцію $r(0)$ флювіального рельєфоутворення;

2) *евристичного моделювання стоку* за цифровою моделлю рельєфу;

3) *маршрутизації стоку* за цифровою моделлю рельєфу водозбору, яка відбиває характеристики геоморфологічної гетерогенності, і на такій підставі – побудови повної флювіальної (ерозійної) мережі. Потім, через змодельовані параметри мережі рельєфу можна вирішувати задачу формалізації опису неоднорідності гідрологічного режиму.

Отже, запропоновані алгоритми у їх поєднанні забезпечують повний цикл автоматичного подання флювіального рельєфу водозбору. Це дає змогу ввести його структурну модель у комп'ютер у вигляді окремого модуля для будь-яких подальших досліджень гідролого-геоморфологічного процесу та розробок заходів захисту території від несприятливих геоecологічних процесів.

Література

1. Чалов Р. С. Деятельность межвузовского научно-координационного совета по проблеме эрозионных, русловых и устьевых процессов за 10 лет (1986-1995 гг.) / Р. С. Чалов // Эрозионные и русловые процессы / МГУ им. М. В. Ломоносова – 1996. – Вып. 2– С. 5-11.
2. Швеебс Г. И. Формирование водной эрозии стока наносов и их оценка / Г. И. Швеебс – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 184 с.
3. Светличный А. А. Эрозиоведение: теоретические и прикладные аспекты / А. А. Светличный, С. Г. Черный, Г. И. Швеебс. – Сумы: Универ. кн. – 2004.- 410 с.
4. Ковальчук І. П. Регіональний еколого-геоморфологічний аналіз. – Львів: І-т українознавства, 1997. – 440 – с.
5. Сучасна геодинаміка рельєфу України /В.П.Палієнко, А.В. Матошко, М.Є.Барцевський та ін. – К.: Наук. думка, 2005. – 370 с..
6. Черваньов І. Г. Флювіальні геоморфосистеми: дослідження і розробки Харківської геоморфологічної школи / Черваньов І. Г., Костріков С. В., Воробйов Б. Н. -. Харків: ВЦ ХНУ, 2006. – 254 с.
7. Костріков С.В. Анегулярні властивості структурної мережі рельєфу / Костріков С.В., Черваньов І.Г. // Укр. геогр. журн. – 2009 – № 1. – С. 12-19.
8. Багров Н.В. Пространственно-временные отношения в саморегуляции геосистем / Багров Н.В., Боков В.А., Черванев И.Г. // Геополитика и экодинамика регионов. – Симферополь, 2004 – Т. 1. вып. 1. – С.12-19.
9. Симонов Ю. Г. Анализ геоморфологических систем // Актуальные проблемы теоретической и прикладной геоморфологии. – М., 1976. – С. 69-92.
10. Костріков С. В. Цифрові моделі місцевості і три напрямки в геоінформаційному моделюванні водозборів // Людина і довкілля : зб. ст. – Х., 2002. – Вып. 3. – С. 49-54.
11. Костріков С.В. Щодо методик розробки модуля гідролого-геоморфологічної ГІС на підставі оптимізації взаємодії блоків “Дані + Моделі” і визначення атрибутів моделювання / Костріков С.В., Антипова О.І., Петренко А.Л., Кострікова Т.О. // Вісн. ХНУ. – 2002. - № 563. Сер. Геологі. Географія. Екологія. – С.157-161.
12. Костріков С.В. Моделювання гідролого-геоморфологічних характеристик водозбору / Костріков С.В., Воробйов Б.Н. // Укр. геогр. журн. – 2002. – № 2 – С. 43-48.
13. Костріков С.В. Моделювання повенів та паводків на підставі методики стільникового автомату / Костріков С.В., Воробйов Б.Н. // Захист довкілля від антропогенного навантаження : зб. ст. – 2004. – Вып. 9 (11). – С. 74-86.
14. Костріков С.В. Практична геоінформатика для менеджменту охорони довкілля. Навчально-методичний посібник / Костріков С.В., Воробйов Б.Н.. – Харків: Вид-во ХНУ, 2003. – 102 с.
15. Костріков С.В. Атрибутивні дані для ГІС і визначення морфолого-морфометричних атрибутів флювіального рельєфу // Геоінформатика. – 2004. – № 4. – С. 70-77.
16. O'Callaghan. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data / O'Callaghan, J. F., D. M. Mark // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. – 1984. – Vol. 28. – P. 323-344.
17. Ласточкин А.Н. Системно-морфологическое основание наук о Земле (геотопология, структурная география и общая теория систем.). – СПб.: Изд-во СПб ун-та. – 2002. – 762 с.
18. Richards K. Fluvial geomorphology // Progress in Physical Geography. -- 1986. – Vol. 10. – P. 401-420.
19. Самоорганизация и динамика геоморфосистем. Материалы XXVII Пленума Геоморфологической комиссии РАН / отв. ред. А. В. Поздняков. – Томск: Изд-во Ин-та оптики атм. СО РАН, 2003. – 365 с.

Аннотация. Предложен ряд алгоритмов маршрутизации гидрологического стока первичных ложбин по цифровой модели рельефа. Верифицированы и реализованы процедуры моделирования гидролого-геоморфологического процесса на речных и овражно-балочных водосборах.

Ключевые слова: гидролого-геоморфологический процесс, маршрутизация стока, алгоритм, ГИС.

Abstract. The paper introduces several algorithms with respect to hydrological runoff routing and elementary stream channel initialization through a Digital Elevation Model. The modeling procedures for the geomorphic-hydrological process have been verified and implemented for river and gully watersheds.

Key words: hydrological-geomorphic process, channel routing, algorithm, GIS.

Поступила в редакцию 15.04.2009 г.