

5. Лесков Л.В. Философия нестабильности // Вестник Московского ун – та. Серия 7. Философия. – №3. – 2001. – С. 40-61.
6. Снакин В.В. (ред), Толковый словарь по охране природы. – М.: Экология, 1995.
7. Сорокіна Л.Ю. Принципи моделювання природно-антропогенних процесів у ландшафтах зон впливу техногенних об'єктів // Укр. геогр. журн. – 2008. – № 1. – С. 36 – 40.
8. Україна: основні тенденції взаємодії суспільства і природи у ХХ столітті (географічний аспект) / Під ред. Л.Г. Руденка. - К.: Академперіодика, 2005. – 320 с.
9. Шишкин М.А. Эволюция как эпигенетический процесс // Современная палеонтология. – М.:Недра, 1988. – С. 142-169.
10. Методи та засоби математичного моделювання міграції радіонуклідів у природних екосистемах. Т. 1. Від аналізу до математичної моделі / В.М.Ярчук, М.М.Колодницький, А.М.Ковальчук, В.Г.Левицький, О.О.Орлов. – Житомир: ЖІТІ, 2002. - 142 с.

Інститут географії НАН України, Київ

Отримано 5.02.2009

УДК 551.4.01(551.436)+004.9

С.В. Костриков, І.Г. Черваньов

АНГУЛЯРНІСТЬ ФЛЮВІАЛЬНОГО РЕЛЬЄФУ, ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ

С.В. Костриков, І.Г. Черванев

АНГУЛЯРНІСТЬ ФЛЮВІАЛЬНОГО РЕЛЬЄФА, ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

Представлены методология и методика анализа ангулярности(англ. angular properties) флювиального рельефа как объективного системно-структурного свойства земной поверхности, которое описывает, наряду с топологией и метрикой рельефа, его иерархическую организацию и особенности геоморфологических процессов. Соответственно, возникают существенные дополнительные возможности исследования такой формы пространственно-функциональной организации территории, какой в условиях гумидного климата являются флювиальные геоморфосистемы. В этой связи авторами всесторонне анализируется регулирующая роль способов сочленения тальвегов водотоков в гидролого-геоморфологическом процессе флювиального рельефообразования. Подобный анализ позволяет отслеживать явление самоорганизации рельефа посредством исследования его ангулярности. В статье изложены и визуализированы результаты компьютерного моделирования поверхности речного водосбора, флювиальный рельеф которого приближается к своему равновесному состоянию. Сделано сравнение такого «идеального рельефа» с исходными данными цифровой модели, соответствующими реальной поверхности речного бассейна. Указанное моделирование и последующее сравнение выполнены на основании параметров ангулярности рельефа. Результаты получены с помощью авторского программного обеспечения – системы аналитической обработки пространственной информации. Описанный в статье исследовательский подход и полученные на его основе прикладные разработки могут широко использоваться как в сельском и лесном хозяйствах при картировании и прогнозе эрозионных и других неблагоприятных экзогенных процессов, так и при обработке результатов лазерной дистанционной съемки земной поверхности в целях создания чрезвычайно точных карт и моделей последней.

S. Kostrikov, I. Chervanyov

FLUVIAL TOPOGRAPHY ANGULAR PROPERTIES, THEIR MODELING AND ANALYSIS

Kharkiv V. Karazin National University

The methodological paradigm and applied methods of the fluvial topography angular properties analysis are represented in this paper as one more parameter set in addition to its topology and metric properties. These descriptions are considered as crucial system-structural characteristics that describe, depict and outline the watershed fluvial topography hierarchy and geomorphic processes in details. Thus newly opportunities appear with respect to that form of the spatial-functional control of an area, what the fluvial geomorphosystems are. Within this perspective the regulating performance of the channel conjunction angle types within the hydrological-geomorphic process have been considered in details. This consideration allows to trace the fluvial topography self-control phenomenon just on the base of its angular properties. The paper represents the results of the equilibrium watershed topography modeling on the base of its angular properties. The comparison of such “ideal topography” with its initial state, which proceeds from a digital elevation model, has been completed, taking into account the junction angles characteristics. These results have been obtained by the original software – the system of spatial information analytical processing. The results mentioned have been depicted and visualized with few samples of this software graphic user interface. The research approach represented in the paper and applied results of its implementation allow to act within a broad range of opportunities: one can provide thematic mapping and reliable forecast of erosion processes within various areas for agricultural and forestry necessities as well as for the Earth survey laser remote sensing data processing for the digital elevation models and various mapping goals.

Давно було помічено, що одним із регуляторів флювіального процесу є спосіб поєднання водотоків, починаючи з найнижчого порядку (струмка) в ієрархічну флювіальну систему річкового водозбору, що може досягати багатьох тисяч квадратних кілометрів. Спостереження, доступні на будь-якому просторовому рівні, свідчать про те, що флювіальна мережа певного просторового рівня побудована одним і тим же способом – через поступове укрупнення водотоків, що зазвичай утворюють дендритоподібні структури. Спосіб поєднання водотоків у флювіальній мережі відіграє провідну регулюючу роль у гідролого-геоморфологічному процесі руслоутворення, яка відома насамперед з практичного боку – через наявність у руслах річок новоутворень, що заважають судноплавству. З наукової точки зору, трійники автори розглядали як структурні ланки самоорганізації мережі, що здійснюють регуляцію та індикацію процесу самоорганізації. Відповідну систему понять автори вже викладали у попередніх публікаціях [1-8]. Спеціальний розгляд *ангулярних властивостей* (англ. *angular properties*) – співвідношень кутів між тальвегами, що виникають у трійнику, – започаткував у вітчизняній геоморфології С.В.Костріков, який розкрив зміст відповідних понять і категорій більше ніж два десятиріччя тому [1, 2, 5, 6]. Трійники, поєднуючись між собою, визначають ангулярні властивості будь-якої флювіальної мережі, забезпечуючи її найвагоміші риси – односпрямованість і нерозривність у просторі-часі постійного поверхневого стоку [6, 7].

Окремі ангулярні риси мереж тальвегів вивчали і моделювали кілька відомих зарубіжних дослідників [9, 11-19].

Вагомий внесок у вивчення ангулярності в структурі рельєф-поле зробили А.В.Поздняков і І.Г.Черваньов [8]. Вони вперше досліджували структурні мережі на складній топографічній поверхні, на відміну від попередніх плоских моделей, та запровадили до геоморфологічного аналізу поняття “дереву тальвегів” і “дереву вододілів” на загальних топологічних принципах. Важливою монографічною роботою, що узагальнила сукупність знань про флювіальні геоморфосистеми й місце у їх самоорганізації ангулярних властивостей, є [10].

Мета цієї статті полягає у викладенні в концентрованому вигляді властивостей ангулярності як важливої структурно-ієрархічної риси флювіального рельєфу, способів її метричного й топологічного описування та формалізації. Стаття містить емпіричні результати вимірів просторового розподілу ангулярності у водозборі ріки Оскіл (вибірка 700 одиниць) як характеристичної ознаки, яка діагностує геологічний субстрат та притаманні водозбору гідролого-геоморфологічні процеси.

Методика визначення й дослідження ангулярності. Мережу тальвегів, що є основним предметом подальшого дослідження, можна розгля-

дати у різний спосіб, якщо мати на увазі переважно структурне її відображення. Первинною структурною ланкою (структурним вузлом) мережі є “*триїтник*” – місце злиття двох тальвегів, або впадіння молодшого (за структурним порядком та меншого за потужністю водного потоку) до старшого тальвега. Трійник є інваріантним для будь-якої флювіальної мережі, тобто такою первинною структурною ланкою, яка завжди однотипно повторюється, незалежно від співвідношення порядків утворюючих його елементів. Незважаючи на те, що ангулярність вивчають у двовимірному просторі (на площині), слід брати до уваги, що такий трійник у мережі тальвегів є орієнтованим у напрямку стоку води. Кожен трійник складається з трьох обов’язкових, неподільних далі (тобто первинних, *непохідних*) структурних елементів: 1) вузлової точки, де відбувається злиття (впадіння); 2) двох структурних ліній, що сходяться у трійник (називатимемо їх «*вхідними*»), 3) структурної лінії, що виходить з вузлової точки у напрямі стоку («*вихідна*» структурна лінія) (рисунки 1).

Формалізовану методику вивчення ангулярності за величинами кутів у структурних вузлах рельєфу вперше розробив один з авторів цієї статті [1, 2]. Було доведено, що характеристика гідролого-геоморфологічного процесу (ерозійна здатність) адекватно описується через показники магнітуди мережі m , її складності S та їх співвідношення m/S . На цій основі було запропоновано «об’єднану» модель Хортон – Ховарда [9, 14, 15].

Згідно з цією методикою, спочатку (за комп’ютерною програмою, що працює з цифровою моделлю рельєфу) виділяють і вимірюють площі водозборів. Кожна з них поділяється навпіл медіаною, що розпочинається з точки структурного вузла. Отже, медіана є *квазівектором* (на відміну від справжнього вектора, вона фіксує лише одну з двох векторних ознак – саме напрям). Між цими квазівекторами, а також іншими структурними лініями і було визначено характеристичні кути (рисунки 2).

У трійнику типу «*впадіння*» аналогічно визначали лише площу, яка дронується тальвегом молодшого порядку. Дещо інакше підраховували площу водозбору внутрішньої ланки «головного потоку» – структурної лінії старшого порядку (від певного структурного вузла до найближчого у напрямку верхів’я мережі). Знову-таки визначено квазівектори, надалі все повторюється так само, як у попередньому випадку. Інші типи трійників у цьому дослідженні окремо не розглядали.

Викладена методика має, на нашу думку, дві позитивні якості. По-перше, при таких вимірах враховується просторове положення як ближнього (проксимального), так і далекого (дистального) відрізків тальвегу, апроксимованих структурною лінією, отже, величину кута можна вважати об’єктивним *параметром структурної мережі рельєфу* (рисунки 1). По-друге, згаданий квазівектор близький за

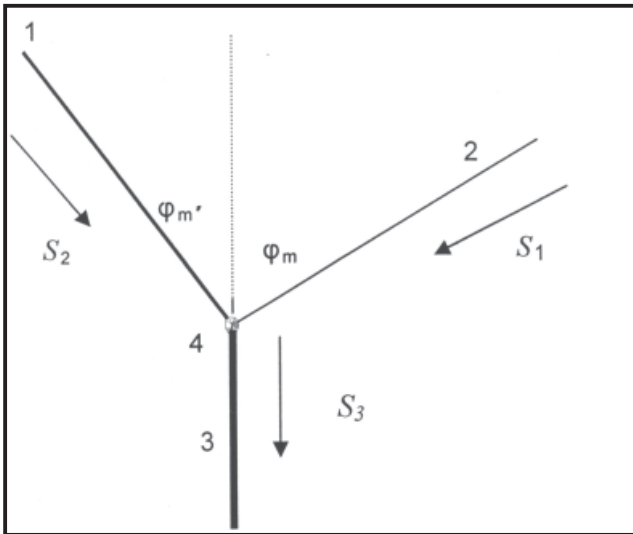


Рисунок 1. Модель ангулярності вузла флювіальної мережі (відображення на площині):

1 - вхідна структурна ланка старшого (за магнітудою) порядку з магнітудою m' ; 2 - вхідна структурна ланка молодшого порядку з магнітудою m ; 3 - вихідна структурна ланка; 4 - вузол трійника; $\varphi_{m'}$, φ_m - кути вхідних структурних ланок відносно осі симетрії (пунктир); стрілки - напрями падіння схилів у водозборах S_1 , S_2 , S_3

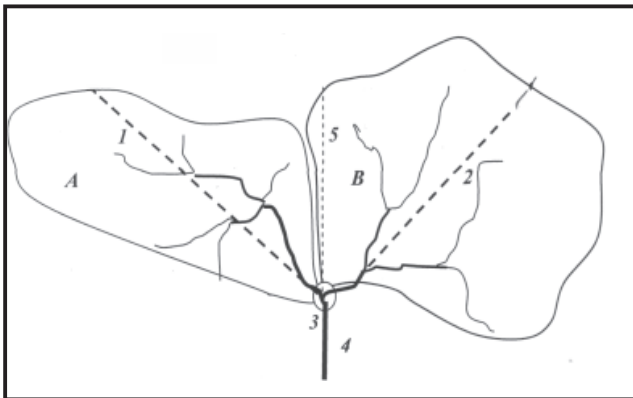


Рисунок 2. Медіани (квазівектори) площ водозборів 3-го порядку: А та Б - водозбори; 1, 2 - квазівектори; 3 - вузлова точка; 4 - вихідна структурна лінія (талвег 4-го порядку); 5 - вісь симетрії трійника. Хвилясті лінії різної товщини у водозборах - талвеги: 1-го порядку - найтонша хвиляста; 2-3-го порядків - товщі хвилясті

значеннями до величини певного комплексного топографічного показника, який автори визначали у [10, с. 133] як "інтегральний ухил субводозбору". Саме виходячи з цих двох понять, можна встановлювати зв'язок між топологічним виглядом рельєфу та його морфологією.

Зв'язок між ангулярністю та морфологією флювіального рельєфу. Формалізація цього зв'язку потребує врахування тривимірного положення трій-

ника. Про два виміри вже йшлося (горизонтальна площина). Третій вимір встановлюється на підставі твердження, що морфологію поверхні водозбору слід описувати через *ухили вихідних тальвегів*. Таку модель, у розвиток моделі Хортон - Ховарда, розробив Д.Пьєрі [17]. Шляхом підстановки в (1) та (2) відомої формули Дж. Флінта [13], що виражає залежність між ухилом русла і його витратою як функціями від порядку цього русла, Д.Пьєрі встановив залежність кутів зчленування водотоків, які є вихідними у трійнику, та відносних ухилів їхніх тальвегів у вигляді:

$$\cos \varphi_m = S_3 / S_1, \quad (1)$$

$$\cos \varphi_{m'} = S_3 / S_2, \quad (2)$$

$$\cos \varphi_m = \left(1 + \frac{m'}{m-1/2} \right)^\alpha, \quad (3)$$

$$\cos \varphi_{m'} = \left(1 + \frac{m}{m'-1/2} \right)^\alpha, \quad (4)$$

де S_1 , S_2 , S_3 - ухили русел приток (1, 2) і результуючого потоку (3); m' і m - магнітуди приток (вхідних структурних ліній) старшого і молодшого порядків відповідно; $\varphi_{m'}$ і φ_m - кути зчленування потоків; α - розрахунковий топологічний параметр (коефіцієнт). Символіка запису у (1)-(4) відповідає позначенням на рисунку 1.

Надалі цю модель варто називати *моделлю Хортон - Ховарда - Пьєрі*. У наших попередніх роботах цю модель було оптимізовано через уведення до неї безрозмірних топологічних показників, які залежать від середнього ухилу водозбору та магнітуди (потужності) мережі рельєфу. *Магнітуда* - це показник, який відображає число первинних водозборів, які відносяться до тальвегів 1-го порядку, що дрениують поверхню вище від замикаючого створу вузла мережі. Від магнітуди залежить потужність відповідного водотоку.

Для оптимізації моделі Хортон - Ховарда - Пьєрі через врахування магнітуди ми використовували лише її математичну частину рівняння (3), (4) у такий спосіб.

Підставляючи в рівняння топологічну змінну, отримуємо фіксований параметр ангулярності, який відповідає розрахунковому коефіцієнту у виразах (3), (4) у такому вигляді:

$$\alpha = \frac{\ln \cos \varphi_{m'}}{\ln \left(1 + \frac{m}{m'-1/2} \right)}. \quad (5)$$

У математичному сенсі, α - це безрозмірний параметр, який дорівнює відношенню зменшення ухилу тальвега, що супроводжує збільшення магнітуди відповідної його ланки, до збільшення (з цієї ж причини) площі водозбору цієї ланки. Детальніше цю методику викладено авторами раніше [3, 4].

З отриманого у такий спосіб виразу (5) витікає, що у випадку, коли співвідношення магнітуд (за схемою Р. Шрива [18]) $m' \gg m$ та різниця їх збільшується), φ_m наближається до 90° , а $\varphi_{m'}$ - до нуля.

Отже, виходячи з цього, в трійнику «впадіння» притока нижчого порядку має впадати в головну, «стовбурну» структурну лінію майже під прямим кутом, що досить часто не відповідає дійсності.

Морфометричний параметр. Виходячи зі співвідношень (1)–(5) та користуючись згаданими результатами досліджень Дж.Флінта [13], можна припустити наступне. Якщо в межах басейну визначити його загальний ухил як такий, що складається з “інтегральних ухилів субводозборів” (ІУС; [10]), і взяти до уваги відповідні їм площі, то записавши логарифми ухилів проти логарифмів площ, одержимо значення α незалежно від його визначення за (3) і (4). Очевидно, що для водозбору, якому притаманний зрілий флювіальний рельєф, що характеризується узгодженою ієрархією ухилів, магнітуд і площ, які дреноються елементами мережі, величини відповідно до виразів (1) – (4), виміряні кожним з цих двох способів окремо, мають бути близькі.

Отже, ІУС є важливим *морфометричним параметром водозбору*. Однак, перевірити у такий спосіб істинність значень ІУС не завжди можливо, насамперед через неврахувану похибку при його визначенні для досить великих площ.

Топологічний параметр. Безрозмірний *топологічний параметр ангулярності* мережі тальвегів можна визначити двома регресійними залежностями: кутів зчленування елементів мережі по магнітудах відповідних її елементів та ухилів тальвегів по площах, що дреноються ними. З іншого боку, названі залежності відбиватимуться через топологічний показник α з (5). Причому, для мережі рельєфу, яка наближається до рівноважного стану, визначені двома різними методами параметри α мають бути близькими за величиною, відбиваючи тим самим загальні тополого-метричні закономірності будови деревоподібної флювіальної мережі.

Розрахункове значення другого топологічного параметру β отримуємо за подібними регресійними рівняннями. Якщо на координатних осях першого графіку відкладемо значення логарифмів лівої частини виразу (3) проти логарифмів правої частини виразу (4) та, відповідно, на осях другого - лівої частини виразу (4) проти правої частини виразу (3), тоді нахил цих двох прямих регресивної залежності

(відомо, що описується чисельним коефіцієнтом у рівнянні прямої) буде мати позитивний знак на відміну від величини α . Така чисельна характеристика і є *топологічним параметром* β . Цей показник є загальним для мережі будь-якого водозбору.

С.В. Костріков довів, що модель планових кутів зчленування в кожному трійнику описується співвідношеннями вигляду:

$$\cos \varphi_m = \left(1 + \frac{m}{m' - 1/2} \right)^\beta, \quad (6)$$

$$\cos \varphi_{m'} = \left(1 + \frac{m'}{m - 1/2} \right)^\beta \quad (7)$$

при тих же значеннях, що й у (3) та (4) і на рисунку 1, але додатково з β – розрахунковим топологічним параметром. Отже, у такий спосіб істотно уточнено модель ангулярності Хортон – Ховарда – Пьєрі.

Просторовий аналіз ангулярності натурального об'єкта. Раніше автори статті встановили три закономірності [1, 2, 7, 10]): 1) при поясненні рельєфоутворювального процесу на схилі необхідно брати до уваги значення кутів зчленування структурних елементів рельєфу; 2) ці показники можна розглядати як статистично очікувані величини для тих форм рельєфу, що мають подібну спрямованість масопереносу у середовищі рельєфоутворювальних процесів; 3) величини кутів зчленування тальвегів, поряд з висотами рельєфу, можуть бути показником певного ступеню його організації, отже з метою оптимізації мережі рельєфу її ангулярні параметри можуть бути задані залежно від ухилів поверхні (градієнта ухилу відповідного схилу).

Як тестовий водозбір, на флювіальному рельєфі якого виконано просторовий аналіз ангулярності, було обрано басейн р. Оскіл (найбільша ліва притока р. Сіверський Донець). За цифровою моделлю рельєфу (ЦМР), яку ми побудували, користуючись топографічною картою М 1:300 000, розглянуто за описаною методикою кути зчленування лише типу «злиття». На досліджуваному водозборі їх виявилось більше ніж 700. Статистичною обробкою отриманого масиву даних було встановлено, що варіаційні ряди величин кутів мають логнормальний вид розподілу в трійниках різного порядку, причому з дуже подібною формою графіка. Це показує, що статистичний розподіл не залежить істотно від порядку. Останнє, зокрема, може підтверджувати інваріантність трійників, про яку йшлося на початку статті.

Було досліджено ступінь впливу зовнішніх факторів рельєфоутворення на ангулярні властивості мережі тальвегів. Визначено, що мережі рельєфу водозбору Осколу притаманні властивості геоморфологічної системи з власною спрямованістю саморозвитку. Такий висновок зроблено за аналогією з параметрами ангулярності флювіальної мережі інших відо-

Т а б л и ц я 1. *Параметри ангулярності структурної мережі рельєфу басейну р. Оскіл*

Сумарний порядок структурних ліній (тальвегів) у структурному вузлі рельєфу	Медіанне значення кута в СВР	Сумарний порядок структурних ліній у структурному вузлі рельєфу	Медіанне значення кута в СВР
(1-й + 1-й) = 2	56	(4-й + 2-й) = 6	73
(2-й + 1-й) = 3	65	(5-й + 1-й) = 6	90
(2-й + 2-й) = 4	64	(5-й + 2-й) = 7	90
(3-й + 1-й) = 4	79	(4-й + 3-й) = 7	81
(4-й + 1-й) = 5	79	(5-й + 3-й) = 8	89
(3-й + 2-й) = 5	70	(4-й + 4-й) = 8	88
(3-й + 3-й) = 6	88	(5-й + 4-й) = 9	93

мих регіонів досліджень, виконаних нами безпосередньо. Зокрема, було помічено, що кут злиття (впадіння) збільшується в міру зростання різниці між магнітудами водотоків, що зливаються; кут злиття (впадіння) водотоку одиначної магнітуди звичайно перевищує 50° .

Отже, можна говорити про репрезентативність відображення характеру геоморфологічного процесу параметрами ангулярності, тому що вони відображають залежність еродуючої здатності результуючого потоку (вихідної структурної ланки трійника) від величини планового кута зчленування водотоків вхідних його ланок [6].

За графіком та наведеними нижче фактичними даними (таблиця 1) встановлено два емпіричні правила, що потребують перевірки на інших об'єктах дослідження того ж типу й у подібних природних умовах функціонування водозборів: 1) для СВР типу «злиття» медіанні значення кутів тим більші, чим більший сумарний порядок елементів рельєфу, які утворюють вузол; 2) у СВР типу «впадіння», на додаток до цієї залежності, кути зчленування тим більші, чим більша різниця порядків елементів, які зчленовуються (таблиця 1).

Ці емпіричні залежності корелюють з особливостями просторових супідрядностей структурних елементів на обмеженій площі певного субводозбору. Обидві закономірності не суперечать оптимізованій авторами теоретичній моделі Хортон-Ховарда-Пьєрі для флювіальної мережі.

Оцінити вірогідність використаної моделі ангулярності можемо шляхом порівняння емпіричних і розрахункових кутів зчленування елементів рельєфу, відклавши значення перших на осі абсцис, других – на ординатній осі. За браком місця, цей графік тут не наводиться (його вміщено у монографії авторів). Встановлено, що лінійна кореляція між емпіричними і розрахунковими значеннями дуже висока і дорівнює 0,875. Отже, запропонована вище модель ангулярності, що використовує топологічні змінні, демонструє добру відповідність реальній мережі рельєфу.

Комп'ютерне моделювання рівноважного флювіального рельєфу за допомогою параметрів ангулярності. У файл відповідного формату, який підтримує авторське програмне забезпечення, розроблене С.В. Костріковим, було генеровано матрицю значень функції результативної ознаки у від ряду факторних ознак x_i : $y(x_1, x_2, x_3, x_4)$ - медіанних значень кутів зчленування елементів мережі; x_1 - сумарного порядку елементів мережі, що зчленовуються, (для вузлів рельєфу двох типів); x_2 - сумарного порядку елементів мережі (для вузлів типу «злиття»); x_3 - сумарного порядку плюс різниця порядків елементів мережі (для вузлів типу «впадіння»); x_4 - різниці порядків елементів мережі (для вузла типу «впадіння»).

Між кожним з перелічених факторів і результативною ознакою обчислено лінійні коефіцієнти кореляції й оцінено ступінь їхньої достовірності. Таблична модель наближено передається регресійною залежністю з двома коефіцієнтами, які можна обчислити шляхом мінімізації середньоквадратичного відхилення. Отримано ряд рівнянь регресії для розрахунку ангулярних параметрів моделі *рівноважного флювіального рельєфу водозбору* (таблиці з [10, с. 210]).

В усіх випадках спостерігається тісна кореляційна залежність, а для СВР типу «злиття» вона наближається до функціональної. Натомість, аналіз кореляційних величин свідчить на користь деякої переваги моделі злиття потоків А.Ховарда [14] порівняно з класичною схемою Р. Хортон [9].

У зв'язку з неасоціативністю порядків бонітування Стралера [1, 10] виникає необхідність при визначенні параметрів ангулярності оперувати зі значеннями *магнітуди* (ланки, тальвегу), а не *порядку*, використовуючи відношення (3) і (4) (рисунки 1). Безрозмірний змінний параметр у цих відношеннях (топологічний показник) α , як це впливає з викладеного вище, визначається двома регресійними залежностями – 1) кутів зчленування по магнітудах цих елементів; 2) ухилів тальвегів елементів мережі по площах, що дрениються ними. Причому для ме-

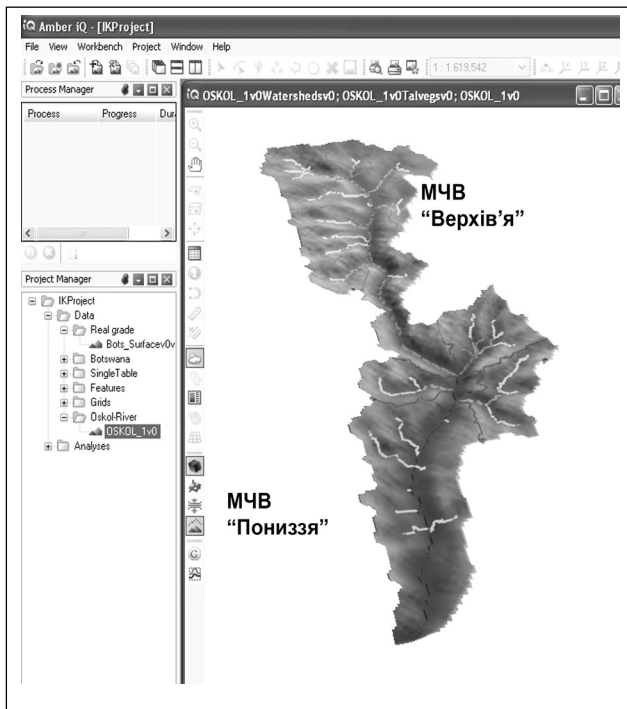


Рисунок 3. Візуалізація в САОПІ Amber iQ результатів ймовірно-статистичного моделювання рівноважного флювіального рельєфу методом обчислення параметра α за регресійною залежністю між логарифмами кутів злиття тальвегів і логарифмами їх магнітуд відповідно до логарифмів правих частин виразів (3), (4) по їх лівих частинах. Моделювання й візуалізацію здійснено по двох морфологічних частинах басейну р. Оскіл (верхів'я, пониззя) з урахуванням просторового розподілу ГВМР для "рівноважного" флювіального рельєфу. Темні криві – вододіли, світлі – тальвеги, положення яких обчислено теоретично

режі, що наближається до свого рівноважного стану, топологічний показник α , визначений двома згаданими регресіями, має приблизно збігатися, якщо він відображає дійсні загальні топологічні закономірності будови деревоподібних мереж і характер залежностей (3), (4), (6), (7).

У середовищі авторської системи аналітичної обробки просторової інформації (САОПІ) Amber iQ (в її розробленні брав безпосередню участь С.В.Костріков) були змодельовані, окремо в рамках кожного з названих підходів, мережа і топологічний образ флювіального рельєфу басейну р. Оскіл, які доцільно проілюструвати тривимірними зображеннями (рисунки 2, 3).

Причому, в основі підходу (1) застосовано просторовий розподіл показника геостатистичної варіабельності морфології рельєфу (ГВМР) [3], який відповідає "рівноважному" рельєфу, а при підході (2) – образ реального рельєфу (візуалізація його цифрової моделі), що порівнюється з топографічними картами цієї території.

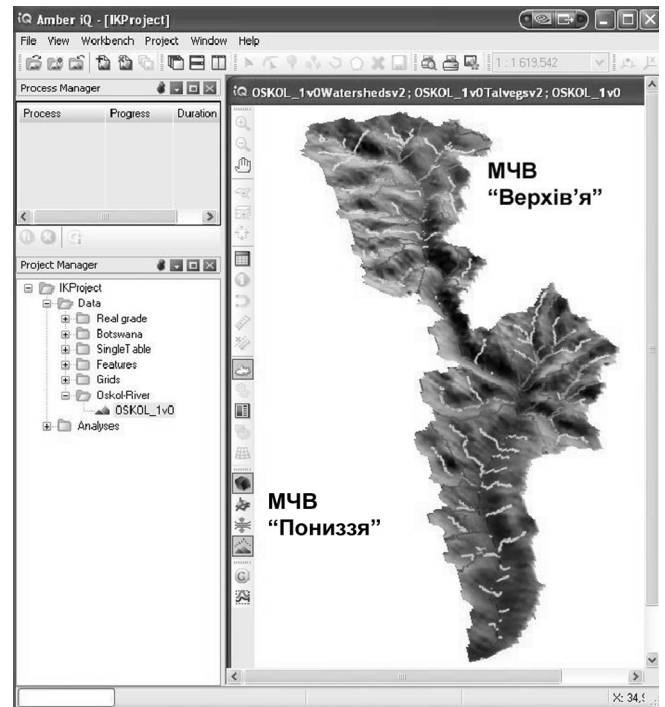


Рисунок 4. Візуалізація в САОПІ Amber iQ результатів ймовірно-статистичного моделювання морфології / мережі рельєфу методом обчислення параметра α за регресійною залежністю між логарифмами похилів тальвегів і логарифмами площ, які дрениються цими тальвегами. Моделювання й візуалізацію здійснено по двох морфологічних частинах басейну р. Оскіл (верхів'я, пониззя) з урахуванням просторового розподілу ГВМР для реального флювіального рельєфу

Не важко помітити певну різницю між змодельованими шарами морфології та мережі рельєфу з індексом "0" – перший підхід (рисунки 3 – Watershedsv0, Talvegsv0) та з індексом "2" – другий підхід (рисунки 4 – Watershedsv2, Talvegsv2). У першому випадку (рисунки 3) значно краще простежуються риси рельєфу, який наближається до свого рівноважного стану, тому що залежність "кути зчленування елементів мережі по магнітудам цих елементів" дає можливість використовувати в цій моделі морфології характеристики просторового розподілу мережі "рівноважного" рельєфу.

Очевидно, що результати візуалізації по двох моделях демонструють більший ступінь подібності для морфологічної частини водозбору (МЧВ) "Пониззя" (нижня частина водозбору), ніж для МЧВ "Верхів'я" (верхня частина) (рисунки 3, 4). Тобто підтверджується апріорне припущення про подібність результатів моделювання на підставі двох різних підходів саме для мережі рівноважного рельєфу.

Результати і висновки. Доведено, що структури мережі флювіального рельєфу мають ще одну інформативну ознаку – способи зчленування елементів структурної мережі у трійниках (ангулярні властивості). Автори запропонували способи формалізації ангулярних властивостей плоскої мережі тальвегів у структурних вузлах, що дає можливість об'єктивно порівнювати їх між собою. Виділено й формалізовано параметри ангулярності α та β , через які можливо характеризувати мережі й порівнювати їх. Підтверджено припущення, що в міру зростання магнітуди елемента мережі його тальвег наближається до стану виробленого поздовжнього профілю, що відображається у співвідношеннях виділених параметрів.

На тестовому натурному об'єкті (водозбір р. Оскіл) визначено просторові закономірності співвідношень параметрів α та β залежно від геолого-географічних особливостей водозбору та стану саморозвитку рельєфу. Для забезпечення вірогідності висновків параметри були розраховані двома альтернативними методами.

Безрозмірний топологічний параметр β розраховано по всіх субводозборах басейну р.Оскіл біль-

ше ніж у 700 трійниках. Надалі було сформовано емпіричні вибірки достатнього обсягу по групах субводозборів, які мають подібні ландшафтні умови і близькі за характеристиками мережі рельєфу. За величинами розбіжностей між параметрами визначено відхилення мережі рельєфу від її рівноважного стану, що характеризується відповідною моделлю ангулярності. Стале співвідношення величини α і зворотного значення параметра β об'єктивно відповідає станові зрілого флювіального рельєфу, близького до рівноважного.

Встановлено, що у рівноважному рельєфі спостерігається погодженість інтегральних ухилів субводозборів, ухилів тальвегів і площ, що дрениються останніми. Порівнюючи ангулярну модель рівноважного флювіального рельєфу (як еталон) із візуалізованими даними первинної ЦМР на певну територію, можна визначити спрямованість розвитку гідролого-геоморфологічного процесу в бік посилення чи послаблення руслової та ярочно-балкової ерозії і, відповідно, – накопичення або виносу твердого матеріалу.

Отже, параметри α та β є індикаторами й критеріями подібності мереж.

1. Костриков С.В. Опыт анализа горизонтальной структуры рельефа // Физ. география и геоморфология. - 1987. - Вып. 34. - С. 123-129.
2. Костриков С.В. Некоторые проблемы моделирования горизонтальной структуры рельефа // Моделирование геосистем для рационального природопользования: Сб. докл. Всесоюз. конф. - Кишинев: Штиница, 1988. - С. 28-30.
3. Костриков С.В. Гідролого-геоморфологічний підхід до дослідження водозбірної організації флювіального рельєфу // Укр. геогр. журн. – 2006. - № 3. – С. 46-54.
4. Костриков С.В. Чисельне моделювання рівноважної мережі рельєфу річкового водозбору // Вісник ХНУ. – 2003. - № 604: Геологія – Географія – Екологія. – С. 35-43.
5. Костриков С.В., Воробьев Б.Н. Анализ связи между некоторыми характеристиками структурной сети рельефа водосбора // Вестник ХГУ: Новые направления исследований в географии. - № 365. – 1992. – С. 53-61.
6. Костриков С.В., Решетняк Н.М., Таран О.А. Опыт анализа углов, образуемых внешними звеньями структурной сети рельефа бассейна р.Оскол // Вестн. ХГУ. - 1988. - № 325.: Рациональное природопользование. - С. 22-25.
7. Костриков С.В., Черванев И.Г. Свойства структурной сети флювиального рельефа и изучение эрозионных процессов // Физико-географические процессы и охрана окружающей среды. Сб. научн. трудов. - К.: Наук. думка, 1991. - С. 22-31.
8. Поздняков А.В., Черванев И.Г. Самоорганизация в развитии форм рельефа. – М.: Наука, 1990. – 202 с.
9. Хортон Р.Е. Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. – М.: ИЛ, 1948. - 216 с.
10. Черваньов І.Г., Костриков С.В., Воробйов Б.Н. Флювіальні геоморфосистеми: дослідження і розробки Харківської геоморфологічної школи / Ред. І.Г.Черваньов. – Харків: НВЦ ХНУ, 2006. – 322 с.
11. Abrahams A. Divide angles and their relation in interior link lengths in natural channel networks // Geographical Annal. – 1980. – Vol. 12. – P. 157-171.
12. Evans I. S. Scale-Specific Landforms and Aspects of the Land Surface *Concepts and Modelling in Geomorphology: International Perspectives*. Eds. I. S. Evans, R. Dikau, E. Tokunaga, H. Ohmori and M. Hirano. - TERRAPUB, Tokyo, 2003.- P. 61–84.
13. Flint J. Tributary arrangements in fluvial systems // American Journal of Science. – 1980. – Vol. 280. – P. 26-45.
14. Howard A.D. Optimal angles of stream junction: Geometric, stability to capture and minimum power criteria // Water Resour. Res. - 1971. - V. 7. - P. 863-873.
15. Howard A.D. Problems of interpretation of simulation models of geologic processes. In *Quantitative Geomorphology: Some Aspects and Applications*, Publications in Geomorphology, ed. M.E. Morisawa, New York: Binghamton, 1972. – P. 63-82.
16. Lubove I.K. Stream function angles in dendric drainage pattern // American Journal of Science. - 1964. - V. 262. - P. 325-339.
17. Pieri D.C. Junction angles in drainage network // Journal of Geophysical Researches. - 1984. - V. B89. - P. 6878-6884.
18. Shreve R.L. Statistical law of stream numbers // Journal of Geology - 1966. - V. 74. - P. 17-37.
- Zernitz E. Drainage patterns and their significance // Journal of Geology. – 1932. - Vol. 40. – P. 498-521.