

ПРИРОДНИЧО-ГЕОГРАФІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 911.9+551.4

DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2020.03.013>**І. Г. Черваньов, В. С. Попов**

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО АНАЛІЗУ МОРФОЛОГІЇ РЕЛЬЄФУ ЗА ДАНИМИ РАДАРНОГО ЗНІМАННЯ

Мета дослідження: обґрунтувати можливість побудови структурно-цифрової моделі рельєфу, яка адекватно відображала б його інваріант - флювіальну мережу поверхневого стоку, досягнувши цього у автоматичному режимі обробки й структуризації даних засобами ГІС-технологій. Застосування методів активного радарного знімання є новітнім напрямом розвитку геоморфометрії, який корелює з традиційним морфометричним аналізом рельєфу і є перспективним для дистанційного картографування земної поверхні. Автори визначили підґрунтям цього напряму концепцію структурного інваріанту рельєфу, тому що він зберігає основні риси при зміні системи координат, орієнтування знімальної апаратури, що важливо при дистанційних дослідженнях. Найповнішим відображенням інваріанту є структурно-цифрова модель рельєфу. Виділено такі етапи дослідження: а) вибір схеми впорядкування інваріантної структури; б) створення тривимірної структурно-цифрової моделі рельєфу (СЦМР); в) створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) за даними радіолокаційного зондування земної поверхні – радіолокаційної цифрової моделі рельєфу (РЦМР); г) початкова обробка первинних «сирих» даних; д) визначення способу відтворення вигляду рельєфу (оптичного образу рельєфу) за РЦМР у топологічному й метричному відношеннях. Основні результати: доведено можливість, доцільність і результативність використання первинних матеріалів активного зондування земної поверхні в радіодіапазонах для ефективної прямої побудови СЦМР; застосовано алгоритм прямої обробки РЦМР на додаток чи разом із використанням результатів пасивних сканувань місцевості в оптичних діапазонах для обробки даних зондувань земної поверхні в радіодіапазонах.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу; структурно-цифрова модель рельєфу; ГІС-технології; радарне знімання.

Igor Chervanyov, Vladyslav Popov

V. N. Karazin Kharkiv National University

THE EXPERIENCE OF GIS APPLICATION FOR AUTOMATIC ANALYSIS OF RELIEF MORPHOLOGY USING RADAR REMOTE SENSING DATA

Research purpose: to prove the possibility of constructing a structural digital elevation model which would adequately reflect its invariant - the fluvial surface runoff network, achieving this in the automatic processing and data structuring mode using GIS technologies. The using of active radar imaging methods is the newest direction in geomorphometry development, which correlates with the traditional morphometric elevation analysis. It is promising for remote mapping of the Earth's surface. The authors defined the concept of structural surface invariant as the basis of this direction, because it retains the main features during changing the coordinate system, orientation of the imaging equipment, etc., which are important in remote sensing. The most complete reflection of the invariant is the structural digital elevation model (SDEM). The research includes following stages: a) choosing the scheme of the invariant structure ordering; b) creation of a three-dimensional structural elevation model (SDEM); creation of a DEM based on radar sensing of the Earth's surface (RDEM); initial processing of primary raw data; determining the method of reproducing the appearance of the relief (optical image of the relief) by RDEM in topological and metric terms. Main results: proved the possibility, feasibility and effectiveness of using primary materials of active sensing of the Earth's surface in radio bands for effective direct construction of SDEM; applied a direct RDEM processing algorithm in addition to using the results of passive terrain sensing in the optical ranges to process the data of Earth's surface sensing in radio bands.

Keywords: digital elevation model; structural digital elevation model; GIS-technology; radar imaging methods.

© І.Г. Черваньов, В.С. Попов, 2020

ISSN 1561-4980. Укр. геогр. журн. 2020, 3(111)

Актуальність теми дослідження

Існує нагальна потреба узагальнення досвіду щодо можливостей упорядкування інформації про рельєф земної поверхні, який в [1] визначено як найбільш ємний і «важкий» елемент структури космічної інформації. З настанням інформаційної ери й появою у відкритому доступі матеріалів супутникових зондувань в оптичному та субоптичному діапазонах й активних зондувань земної поверхні в прагматичному світі геоінформатики серед інших додатків з'явився напрям *геоморфометрії*, який певною мірою корелює з традиційним морфометричним аналізом рельєфу. У сфері ГІС-технологій, які стрімко розвиваються, активно досліджують можливості картографування морфології рельєфу за матеріалами зондування радіолокатором бокового огляду зі спеціальних супутників. Останній напрям набув широкого розголосу в науковому світі геоінформатики, де існують потужні центри обробки дистанційних даних¹, проте практично невідомий широкому загалові геоморфологів.

Стан вивчення питання й огляд попередніх досліджень

Наводимо скорочений огляд робіт, надрукованих переважно впродовж останніх 10 років.

Аналізові наукових досягнень та дослідницького апарату флювіальної геодинаміки та регіональної морфоструктури території України присвячено фундаментальну колективну монографію Інституту географії НАН України за редакцією В.П. Палієнко [2], де, зокрема, наведено ГІС-технології картографування у традиційному (морфотектонічному) та новітньому (структуралістичному) аспектах. С. Ю. Бортник та ін. [3] суттєво уточнили поняття морфоструктури, дотримуючись структуралістичного бачення проблеми. С.В. Костріков та І.Г. Черваньов розробили засади вчення про флювіальні геоморфосистеми, у тому числі навели низку оригінальних алгоритмів їх структурного аналізу, насамперед за структурно-цифровою моделлю рельєфу (СЦМР) [4, 5]. Розроблено також комп'ютерну систему «Рельєф-процесор» для структуризації рельєфу за цифровою моделлю рельєфу (ЦМР) [6]. Д.В. Ло-

патін та Є.Ю. Лікунов обґрунтували принципи моделювання рельєфу на основі дистанційних методів, у тому числі матеріалів радіолокаційного знімання, та нових понять структурології рельєфу [7]. Декілька сучасних робіт, присвячених сучасним методам і технологіям цифрового моделювання рельєфу в науках про Землю, вміщено в журналі «Геоморфологи» [8-10].

Проте, у всіх наведених теоретичних моделях та їх алгоритмічних реалізаціях процес розпочинається зі структурно-цифрової моделі рельєфу безвідносно до способу її отримання. А важливим є саме новітній спосіб отримання й первинної обробки інформації. Удосконалюються моделі радіолокаційних даних для зменшення впливу деревної рослинності на якість відбиття радіолокаційного сигналу (SRTM² data) і заповнення свого роду «чорних дір» цього сигналу у певних ділянках поверхні, які виникають з різних причин [11-13 та ін.]. Основна їх увага зосереджена саме на проблемі подолання інформаційного «шуму» (артефактів, за їх термінологією), причому у великих масштабах емпіричної вибірки (наприклад, у роботі [13] охоплено обробкою всю територію Австралії). Проте, практично не використано базову інформацію щодо структурних особливостей рельєфу, отже роботи мають обмежене геоморфологічне значення.

Мета нашого дослідження: обґрунтувати можливість побудови структурно-цифрової моделі рельєфу, яка б адекватно відображала його інваріант – флювіальну мережу поверхневого стоку, досягнувши цього в автоматичному режимі обробки й структуризації даних засобами ГІС-технологій. У світовій літературі запроваджено поняття геоморфометрії, до подальшого розроблення якого й належить це дослідження.

У контексті досягнення цієї мети у статті викладено питання:

– розроблення алгоритмів та ГІС-технологій створення структурно-цифрових моделей рельєфу (СЦМР) для подальшого вирішення в автоматичному режимі певних геоморфологічних та інженерних завдань;

– розроблення методу відтворення вигляду рельєфу (оптичного образу рельєфу) за структурно-цифровою моделлю, отриманою у радіодіпазоні електромагнітних хвиль (РЦМР);

– оцінювання точності, похибок та усунення

¹a) European Commission – DG Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability – Land Management and Natural Hazards Unit, TP Ispra (VA), Italy; b) International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Melbourne, Australia та інші.

² SRTM – (Shuttle Radar Topographic Mission) – глобальна цифрова модель висот.

технічних помилок, які спотворюють образ рельєфу у топологічному й метричному відношеннях.

Виклад основного матеріалу

Створення тривимірної структурної моделі рельєфу

Досліджуючи морфологію рельєфу, було сформульовано принципові положення про низку його основних властивостей, відображення яких є необхідною передумовою створення адекватної тривимірної моделі флювіального рельєфу через правильне подання його структури [9,10]. Таку модель було названо структурно-цифровою моделлю рельєфу (СЦМР).

Основні відмінності СЦМР від існуючих ЦМР:

- реальний рельєф принципово не є гладкою поверхнею (якими є фізичне поле чи математична функція), тому що основні його риси задаються каркасними лініями (гребенями й тальвегами) та характерними точками, які у своїй закономірній сукупності порушують гладкість поверхні. Отже, він не може бути якісно відображений як континуум (рельєф-поле), якщо не передбачити його природну структурованість;

- характерні лінії та точки, зазначені вище, є найбільш інформативними з топографічного та геоморфологічного подань, що певною мірою відображається у способах картографування рельєфу та його морфологічного аналізу, але втрачається при складанні ЦМР;

- характерний вигляд рельєфу визначається каркасними лініями, індивідуальний рисунок яких є неповторним, тому добре розпізнаваним та ідентифікативним для геоморфолога, підлягає ретельному описові, тому що є закономірним;

- каркасні лінії рельєфу утворюють його інваріант, тобто таку стійку структуру, яка зберігає основні риси навіть при зміні системи координат, орієнтування знімальної апаратури тощо, тому що належить до внутрішньої геометрії рельєфу і повно відображається лише в СЦМР.

Вибір схеми впорядкування інваріантної структури

Надалі розглядаємо мережу тальвегів, розуміючи, що систему вододілів можна отримати автоматично за принципом: між двома тальвегами є вододіл, порядок якого визначається молодшим з цих тальвегів.

Важливими є такі три складні завдання, що набувають значення нині через масовий розвиток дистанційних засобів дослідження рельєфу:

- спосіб відбору точок, що мають бути точно визначені апріорі, для того щоб відображення рельєфу так само точно відповідало призначенню;

- спосіб перебудови ЦМР у СЦМР, оскільки остання має адекватну топологічну структуру і на 1-2 порядки зменшує обсяг оброблюваного масиву даних порівняно з вихідною;

- універсалізація цифрової моделі, яка дає змогу через комбінування окремих ЦМ алгоритмічно створювати різні образи, похідні від СЦМР.

Спосіб відбору точок для створення первинної ЦМР диктується технологічними можливостями. Алгоритми перетворень ЦМР в СЦМР є досить складними, що виправдовує себе у подальшій роботі як ефективний засіб для контролю якості даних, недосяжний за традиційних технологій цифрування рельєфу. Проте, така робота потребує складних маніпуляцій з даними, якщо їх джерелом є супутникове сканування земної поверхні в оптичних діапазонах, це пов'язано з тим, що вихідні для цього показники яскравості залежать від альбедо, яке, в свою чергу, визначається кількома характеристиками. Серед них, крім залежних від рельєфу мережі стоку, експозиції та крутизни скату, є, як відомо, рослинний і ґрунтовий покриви, спосіб землекористування та інфраструктура місцевості. Істотно, часто вирішальне, значення мають стан атмосфери та різні атмосферні явища, значущість сезону року й часу доби. Усі ці й інші обставини, комбінуючись, перетворюють дані оптичного сканування на складну мозаїку, у якій корисний (щодо рельєфу) сигнал затьмарюється оптичними «шумами», розібратися в яких не під силу будь-якому прямому алгоритмові.

Отже, наступне завдання – прямий спосіб побудови моделі рельєфу через активне зондування поверхні Землі засобами радарного знімання, враховуючи те, що відбитий радіосигнал значною мірою вільний від перерахованих «шумів» (проте має інші вади, які ми намагаємося знівелювати).

Побудова ЦМР за даними радіолокаційного зондування земної поверхні: утворення радіолокаційної цифрової моделі рельєфу (РЦМР)

Для того, щоб побудувати аналітично радіолокаційний образ рельєфу, необхідно вирішити зворотне завдання визначення просторового положення (тобто зовнішньої геометрії) певних елементарних його ділянок, кожна з яких можна було б вважати за похилу площину, а рельєф представити як багатогранник.

Стандартні способи побудови ЦМР не дають змоги відтворити таку будову рельєфу через випадковий характер матричної ЦМР та плоский спосіб запису ізолінійної моделі. Структурно-цифрове моделювання дає принципову можливість відтворення тривимірної моделі рельєфу. Коротко завдання зводиться до того, щоб мати можливість визначити у радіодіапазоні «яскравість» кожної елементарної площини, що є гранню багатогранника, задаючи елементи її зовнішнього орієнтування щодо приймальної апаратури та враховуючи такі зовнішні щодо цієї системи чинники як стан атмосфери, альbedo та індикатрису розсіювання земної поверхні (земних покривів), які визначають потужність відбитого сигналу. Сукупність таких яскравостей створює мозаїку *радіолокаційного образу рельєфу* (РЛОП). Дослідження, проведені на різних тестах, а також на різних типах і станах рельєфу, довели високу точність його відображення у радіолокаційному образі рельєфу, що дає можливість візуалізації ділянок місцевості, недоступних для спостереження, або ж синтезу оптичного вигляду уявних та умовних РЛОП; наприклад, щоб використати значний інтелектуальний апарат візуального дослідження об'єктів та явищ, здавна застосовуваний геоморфологами) [1-3 та ін.].

Початкова обробка «сирих» даних

З точки зору геоморфолога, ЦМР має забезпечити адекватність у таких відношеннях:

- а) якою мірою враховано шорсткість поверхні (мікро- та мезорельєф);
- б) наскільки точно можна виявити реальні гребені й тальвеги;
- в) наскільки закономірно змінюються висоти в дендритах тальвегів (оскільки їм притаманний односпрямований водний потік);
- г) чи є топологічно адекватною «картинка» рельєфу згідно з його генезисом та динамічними процесами.

Як вихідні експериментальні дані було використано відкриті джерела SRTM та ASTER GDEM³ з останніми уточненнями й ітераційно підвищеною точністю характеристик. Вихідні дані надаються з корекцією найкритичніших вад радіолокаційного сканування – «порожнин» без відбиття сигналу (voids), що являють собою ділянки без зафіксованої інформації про яскравість в обраних

діапазонах радіохвиль. Процес просторового заповнення пустот РЦМР включає різні підходи і, як правило, базується на використанні даних з інших ЦМР, тому можна вважати, що структуру рельєфу корекції цього типу артефактів істотно не спотворює [12]. SRTM та GDEM апаратно представлені радіолокаційно синтезованою апертурою (SAR)⁴. У сантиметрових діапазонах випромінювання сигнал має тенденцію значно відбиватися від рослинного покриву. Отже РЦМР SRTM та GDEM мають стійкі риси деякого спотворення цифрової моделі місцевості, тому що деревостан може потенційно впливати на результати структурного аналізу рельєфу (*рис. 1*).

Існує методика видалення «шумів» від сканування рослинного покриву [13], але у нашому експерименті ми обрали ділянку з мінімальним впливом рослинності на дешифровані структурні елементи, щоб початково уникнути впливу рослинності.

Артефактами радіолокаційного знімання рельєфу, що не лише впливають, а й унеможливають структурний аналіз, є замкнуті депресії (sinks). У структурному відношенні ці локальні зниження являють собою чарунки, що мають невизначений напрям стоку. При розрахунку акумуляції стоку за нескорегованою РЦМР цілісності дендриту ліній стоку не спостерігається, що суперечить дійсній будові флювіального рельєфу, тому модель стоку розривається наявними артефактами, не забезпечуючи можливості правильно відтворити його закономірну топологічну структуру (*рис. 1*).

Тому для автоматичного виділення мережі стоку наявність у вихідних даних гідрологічно коректної РЦМР є необхідною умовою. Методично «заповнення» уявних замкнених депресій нами було виконано у середовищі ArcGIS (інструмент Fill модуля Spatial Analyst). Він базується на принципі ітераційного заповнення основних та виникаючих на їх периферії знижень з урахуванням заданого обмеження по висоті (Z-індекс) [11]. Після отримання гідрологічно коректної моделі образ флювіальної мережі набув цілісної дендритної структури (*рис. 2*).

У змістовому відношенні попередня обробка (пре-обробка РЦМР) має три основні мети: усунути грубі помилки та артефакти; досягти кращої апроксимації РЦМР; якомога краще передавати гідролого-геоморфологічні (за С. Костріковим) та

³ ASTER GDEM – (ASTER Global Digital Elevation Model) – глобальна цифрова модель висот.

⁴ SAR - синтезована радіолокаційна апертура (техн.)..



Рис. 1. Деяке спотворення цифрової моделі флювіальної мережі, пов'язане з впливом рослинності

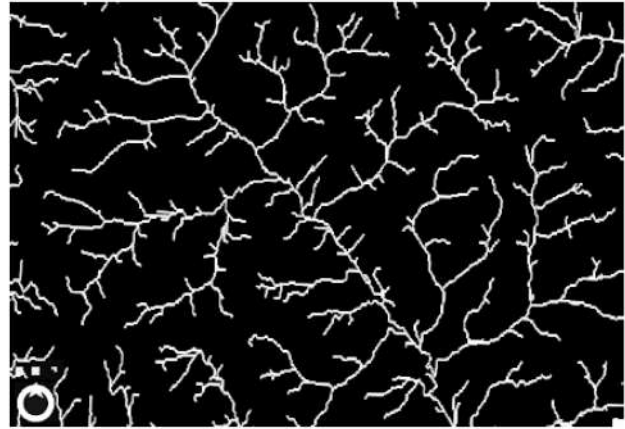


Рис. 2. Образ флювіальної мережі після корегування із застосуванням РЦМР

інші процеси. За умови їх виконання, може бути забезпечена застосовуваність РЦМР для достовірного геоморфометричного аналізу.

З геоінформатики відомо, що деякі алгоритми є точнішими при оцінюванні значень параметрів і об'єктів у певній предметній області. Як показує досвід західних дослідників стосовно застосування геотехнологій для оцінювання РЦМР, вони завжди зосереджені на критеріях метричної точності моделі по відношенню до рельєфу. Тому найпростішим способом могло б слугувати попиксельне зіставлення двох «рельєфів»: отриманого традиційно (наприклад, скануванням топопланшету і порівнянням значень пікселів з відмітками у точках місцевості на карті, які можна точно ідентифікувати) і статистичної обробки похибок РЦМР. Проте ми поставили мету досягти повної автоматизації побудов і обчислення відповідних критеріїв, тому цей спосіб, що включає «ручні» операції, будемо вважати неприйнятним.

У друківаних працях наводяться й інші докази неадекватності такого аналізу. Наприклад, математичні функції похідних висотних матриць вищого порядку можуть бути пов'язані з серйозними проблемами через надмірну чутливість до інформаційних «шумів» [14]. Наводяться дані, що чутливість локальних параметрів до шуму ЦМР (а також їх залежність від щільності сітки пікселів) зростає в такому порядку [15,16]: функції перших похідних; лінійні функції других похідних (прості кривизни); квадратичні функції других похідних (сумарні кривизни). Зазначимо, що ці чисто геометричні параметри можна визначити лише для гладкої поверхні, яка відповідає

відомим властивостям математичної функції: однозначності, безперервності та плавності [5]. Проте, флювіальний рельєф таким не є, і з цієї причини перераховані вимоги до ЦМР виконати неможливо принципово.

У більшості випадків опису обробки дистанційної інформації цей етап розглядається як суто технічний момент і не описується належним чином у наукових термінах геоморфометрії. Проте, він є суттєвим, адже від способу попередньої обробки «сирих» даних залежить якість РЦМР.

У результаті ми отримуємо візуальний образ РЦМР, який досить добре передає топологію рельєфу загалом, навіть краще, ніж візуалізація рельєфу на цифровій топографічній карті до її редагування. Проте, при детальному аналізі виявляються похибки, спричинені деякими ландшафтними рисами тому, що деревний рослинний покрив, а також водойми й водно-болотні ландшафти у певних діапазонах радіохвиль надто спотворюють сигнал. З цієї причини отримані інтерполяцією за РЦМР горизонталі втрачають плавність, набувають звивистості, отже, візуальний образ рельєфу спотворюється. Друга звичайна вада інтерполяції за регулярною сіткою (яка лежить в основі обробки РЦМР) – виникнення спотворень у вигляді замкнених контурів – проявляється незначно, тому що локалізується в тальвегах.

Найістотнішою вадою РЦМР є відсутність сигналу з заплав та русел водотоків і водойм, через що вони мають вигляд суцільних сірих смуг.

Удосконалення матриці висот РЦМР можливе способом «сковзного вікна», який є достатньо відомим і алгоритмізованим. Зазначимо, що вікном

для осереднення слугували дані з 9 точок регулярної матриці, серед яких середня була пріоритетною. Стосовно нашого завдання, такий прийом описано в [14].

Позитивний результат такого покращення РЦМР видно з візуального порівняння рисунків, розміщених поряд. Зазначимо, що згідно з теорією, якість будь-якої ЦМР визначається її геодезичною точністю та топологічною подібністю.

Аналіз точності, помилок і похибок

Для встановлення геодезичної точності ми визначили висоти у центральних точках трійників та на вершинах (командних точках рельєфу) за моделлю та порівняли з незалежними топографічними даними. Середня квадратична похибка відповідає вимогам до топографічної карти плану масштабу 1:100 000.

Топологічну подібність визначено візуальним порівнянням загального вигляду рельєфу, що є загалом задовільним, та порівнянням трасувань ліній і положенням точок злиття тальвегів. Ці характеристики не потребують кількісної оцінки (топология ними нехтує), тому лишаються якісними.

Конкретні типи помилок у різних джерелах даних

Кількість помилок та їхній вплив на параметри й об'єкти земної поверхні значною мірою залежать від того, як було отримано виміри висоти і матриці висот.

Артефакти ЦМР можна усувати шляхом гідрологічної корекції. Є безпосередня методика (зазначимо, що для іншого ГІС-пакету), проте головне – принцип: усувати похибки, пов'язані з локальними западинами (замкнені форми, які переривають тальвеги в наших попередніх моделях).

Найістотнішими похибками є порушення топологічної відповідності моделі рельєфу поверхні.

Аналог подібного алгоритму усунення западин реалізовано в ArcGIS, і при розрахунку напрямів стоку та акумуляції за скорегованою РЦМР (без жодного закрублення рисунку горизонталей) отримано абсолютно цілі "дерева".

Технологічні обмеження

Важливими є також помилки та похибки, спричинені апаратними та рельєфними особливостями. Складний технічний спосіб визначення апаратної помилки подано в [15]: відповідно до виміру точності фази, геометрії зображення, що отримується в результаті орбітального руху су-

путника, і атмосферних спотворень, які впливають на поширення хвиль. Така інформація може бути дуже корисною для підготовки ЦМР, оскільки вона забезпечує можливість визначити області (ділянки), які неадекватно відображені. Багато приладів мають постійну похибку вимірювання, що полегшує визначення відмінності між шумом і локальною мінливістю. Отже, слід очікувати, що матриця висот є неоднорідною – вона повинна показувати різну шорсткість поверхні в різних частинах області знімання, проте з видаленим шумом. Наприклад, SRTM DEM буде показувати шум, який є постійним у всій області, що картографується, і його можна позбутися ще у процесі первинної обробки.

Систематичні помилки обробки можуть бути зменшені шляхом ретельної підготовки і використання певних методів, таких як збільшення контрасту в затінених областях або заміна ненадійних відміток на позначки з інших, більш надійних джерел даних, а за можливості – повторних зальотів (наприклад, в різних напрямках польоту, в різні дати) з попиксельним порівнянням результатів. Випадкові помилки часто пов'язані з помилкою виміру, тобто шумом сигналу.

Вплив помилок матриці висот на найпоширеніші параметри поверхні Землі (експозиція, кут нахилу, топографічний індекс розчленованості) оцінено в [17]. Автори дійшли висновку, що систематичні помилки можна зменшити у процесі обробки, якщо більше число знімків використовується для отримання локальних параметрів земної поверхні (наприклад, ухилу). Тобто, можна відфільтрувати справжню шорсткість поверхні й закінчити побудову за допомогою більш гладких матриць висот.

Висновки

1. Розроблено й застосовано алгоритм прямої обробки РЦМР на додаток чи разом із використанням результатів пасивних сканувань земної поверхні в оптичних діапазонах. Це дає можливість надалі працювати з геоданими, поєднуючи в одному дослідницькому полі активне радарне зондування, розкриті й ілюстроване у статті, з відомими пасивними оптичними скануваннями, які можуть значно доповнювати одне одного й водночас бути незалежними взаємно контролюючими засобами технологічного процесу. Для цієї мети, як приклад, застосовано до РПМР відомі методологічні поняття теорії оптичного образу рельєфу та алгоритмів побудов СЦМР, розробле-

ні авторами або за їх участі.

2. Оцінено обмеження й похибки зондувань земної поверхні в радіодіапазонах, а також їх вплив на якість РЦМР для точних метричних побудов, зокрема, у середньому масштабі топографічної карти.

3. Доведено (теоретично й експериментально) можливість, доцільність і результативність використання первинних матеріалів активного зондування земної поверхні в радіодіапазонах для ефективної прямої побудови СЦМР відпо-

відно до завдань геоморфометрії рельєфу земної поверхні. Внесок авторів полягає у впровадженні оригінальних понять структури рельєфу, розроблених до впровадження геоінформаційних технологій: інваріанту, системного розгляду морфометрії й топології рельєфу як основних його складових. Цим доповнено зміст геоморфометрії, яка активно розвивається у зв'язку з дистанційним аналізом, особливо за геоданими радарного знімання, оскільки у ній топологічна складова відіграє чільну роль.

References [Література]

1. Simonov Yu. G. (1998). *Relief morphometric analysis*. Smolensk, 272 p. [In Russian]. [Симонов Ю. Г. Морфометрический анализ рельефа. Смоленск, 1998. 272 с.]
2. Palienko V.P., Varshchevskiy M.Ye., Spytisia R.O., Bagmet O.B., Romanenko H.V., Chebotariova L.Yu. (2013). *Morphostructural-neotectonic analysis of Ukraine's territory (conceptual foundations, methods and implementation)*. Kyiv, 263 p. [In Ukrainian]. [Морфоструктурно-неотектонічний аналіз території України (концептуальні засади, методи та реалізація) / В.П. Палієнко, М. Є. Барщевський, Р. О. Спиця, О. Б. Багмет, Г. В. Романенко, Л. Ю. Чеботарьова. Київ, 2013. 263 с.]
3. Bortnyk S. Yu., Kovtoniuk O. V., Pogorilchuk N. M. (2009). Morphostructural Mapping: Evolution of Views and the Problem State. *Physical Geography and Geomorphology*. Iss. 56, 18–29. [In Ukrainian]. [Бортник С.Ю., Ковтонюк О.В., Погорільчук Н.М. Морфоструктурне картографування: еволюція поглядів та стан проблеми // Фіз. географія та геоморфологія. 2009. Вип. 56. С. 18-29.]
4. Kostrikov S. V., Chervanyov I. G. (2009). Relief morphology as a control element of the hydrologic-geomorphological process at the watershed. *Physical Geography and Geomorphology*. Iss. 56, 67–73. [In Ukrainian]. [Костріков С.В. Черваньов І.Г. Морфологія рельєфу як керуюча ланка гідролого-геоморфологічного процесу на водозборі // Фіз. географія та геоморфологія. 2009. Вип. 56. С. 67-73.]
5. Kostrikov S. V., Chervanyov I. G. (2010). *Research of the fluvial landform self-organization phenomenon on the basis of the modern natural science synergetic paradigm*. Kharkiv, 144 p. [In Ukrainian]. [Костріков С. В., Черваньов І.Г. Дослідження самоорганізації флювіального рельєфу на засадах синергетичної парадигми сучасного природознавства. Харків. 2010. 144 с.]
6. Krivtsov V., Kostrikov S., Staines H. J., Vorobiov B., Brendler A. (2005). Some Aspects of the Computer Technologies Application to Ecological Modelling: Case Studies of Microsoft Excel, and 'Relief-Processor' - A Modelling System for Geocological Research. In *New trends in Ecology Research*. New York, 103–118.
7. Lopatin D. V., Likunov E. Yu. (2019). *Structural and exploratory geomorphology: a textbook for universities*. Moscow, 267 p. [In Russian]. [Лопатин Д. В., Ликунев Е. Ю. Структурная и поисковая геоморфология: учебное пособие для вузов. Москва, 2019. 267 с.]
8. Bairak G. R., Kravchuk Ya. S. (2016). Construction of morphometric maps using GIS tools for studying the history of the development of the Gologoro-Kremenets ridge. *Geomorphologists: Modern Methods and Technologies for Digital Terrain Modeling in Earth Sciences*. Iss.6. Moscow, 40-44. [In Russian]. [Байрак Г. Р., Кравчук Я. С. Построение морфометрических карт средствами ГИС для изучения истории развития Голгоро-Кременецкой гряды // Геоморфологи: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. Вып. 6. Москва, 2016. С. 40-44.]
9. Samsonov T. Ye. (2016). Cartographic methods for visualization and generalization of digital elevation models. *Geomorphologists: Modern Methods and Technologies for Digital Terrain Modeling in Earth Sciences*. Iss. 6. Moscow, 9 – 18. [In Russian]. [Самсонов Т. Е. Картографические методы визуализации и генерализации цифровых моделей рельефа // Геоморфологи: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. Вып. 6. Москва, 2016. С. 9–18.]
10. Koshel S. M., Entin A. L. (2016). Modern methods for calculating the distribution of surface runoff by digital elevation models. *Geomorphologists: Modern Methods and Technologies for Digital Terrain Modeling in Earth Sciences*. Iss. 6. Moscow, 24 – 34. [In Russian]. [Кошель С. М., Энтин А. Л. Современные методы расчета распределения поверхностного стока по цифровым моделям рельефа // Геоморфологи: Современные методы и технологии цифрового моделирования рельефа в науках о Земле. Вып. 6. Москва, 2016. С. 24 – 34.]

11. Tarboton D.G., Bras R.L., Rodriguez-Iturbe I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrol. Process.*, 5, 81-100. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>
12. Reuter H. I., Nelson A., Jarvis A. (2007). An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9), 983–1008. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658810601169899>
13. Gallant J. C., Read A. M., Dowling T. I. (2012). Removal of tree offsets from srtm and other digital surface models. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B4, 275–280. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-275-2012>
14. Carlton D., Tennant K., (2001). DEM quality assessment. In: Maunel D.F. (ed.). *Digital Elevation Model. Technologies and Applications: The DEM User's Manual*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, 395–440.
15. Bamler R. (1997). Digital Terrain Models from Radar Interferometry. In *Photogrammetric Week '97*. D. Fritsch, D. Hobbie (eds.), Wichmann, Karlsruhe, 93-105.
16. Hofer M., Sapiro G., Wallner J. (2006). Fair polyline networks for constrained smoothing of digital terrain elevation data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44 (10), 2983–2990. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.875451>
17. Raaflaub L. D., Collins M. J. (2006). The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. *Environmental Modelling & Software*, 21(5), 710–732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.02.003>

Стаття надійшла до редакції 29.02.2020

УДК 911.2:556.5

DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2020.03.020>

В.Г. Маргарян

Ереванский государственный университет, Республика Армения

ВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗИМНЕГО МИНИМАЛЬНОГО ДЕКАДНОГО СТОКА РЕК БАСЕЙНА ОЗЕРА СЕВАН

Цель этого исследования – анализ и оценка закономерностей временных изменений зимних минимальных декадных расходов в ряде многолетних наблюдений для рек, впадающих в озеро Севан, а также анализ и оценка закономерностей временных изменений зимних температур воздуха и атмосферных осадков в пределах бассейна озера Севан. Для выполнения работы использованы данные наблюдений 12 гидрологических постов государственной некоммерческой организации «Центр гидрометеорологии и мониторинга» Министерства окружающей среды Республики Армения и методы: математико-статистический, экстраполяционный, интерполяционный, анализа, аналога, корреляционный, картографический. Рассмотрены закономерности изменения 75 %-ной обеспеченности зимнего минимального декадного стока в зависимости от площадей водосборов. Полученные зависимости можно использовать для получения 75 %-ной обеспеченности зимних минимальных декадных расходов неизученных и мало изученных рек исследуемой территории за календарный год. Построена карта распределения модуля среднего минимального зимнего стока за декаду с наиболее низкой водностью 75 %-ной обеспеченности. Установлено, что наблюдается как тенденция роста (58 %) зимних средних декадных минимальных расходов, так и (42 %) тенденция уменьшения. Скорость изменения зимних средних декадных минимальных расходов составляет от $-0,133$ до $+0,13$ м³/с/10 лет. На р. Аргичи в п. Геташен за 50 лет произошло увеличение зимнего минимального декадного стока на $0,65$ м³/с, а на р. Личк в п. Личк – уменьшение на $0,67$ м³/с. Рассмотрены также временной ход средних температур воздуха и атмосферных осадков за зимний период. Установлена тенденция роста температур воздуха и атмосферных осадков. Выявленные тенденции изменений зимних минималотных декадных расходов рек бассейна озера Севан важны при решении водохозяйственных проблем и вопросов экологического значения.

Ключевые слова: минимальные декадные расходы; обеспеченность; временные изменения; бассейн озера Севан; Армения.

© В.Г. Маргарян, 2020