

О.М. Іванік, Т.В. Андрієць, С.В. Муравко

## СТРУКТУРНО-МОРФОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ У СЕРЕДОВИЩІ ГІС ДЛЯ КАРТОГРАФУВАННЯ ГІРСЬКОГО РЕЛЬЄФУ (НА ПРИКЛАДІ КАРПАТСЬКОГО МОДЕЛЬНОГО ПОЛІГОНА)

Проаналізовано головні положення класичної методики структурної морфометрії та визначено можливість її використання для дослідження морфогенезу і тектогенезу гірськоскладчастих зон. Продемонстровано можливість адаптації цієї методики до середовища ГІС. Здійснено обробку морфометричних даних і побудову серії морфометричних карт із застосуванням ГІС-аналізу та просторового моделювання для Карпатського модельного полігона. Розроблено програмний модуль, що дає змогу автоматизувати операції структурно-морфометричних побудов.

**Ключові слова:** структурна морфометрія, Карпати, неотектоніка, ГІС.

На сьогодні дослідження неотектонічних і сучасних рухів, а також пошук і виявлення різноманітних тектонічних структур здійснюються на основі різних методичних засад та підходів. Загальновідомими та ефективними є методи, що забезпечують постановку робіт і якісний аналіз для вирішення питань щодо генезису цих рухів, їх впливу на формування рельєфу, процеси рудогенерації у новітніх тектонічних структурах та ін. [6–8, 21, 22]. Найпоширенішими є геофізичні та структурно-геологічні методи, однак для дослідження тектоніки та геоморфологічної будови певних структурно-тектонічних зон необхідно розробляти, впроваджувати і використовувати особливі прийоми й методологічні підходи. Це насамперед метод структурної морфометрії, розроблений у 1950-х роках В.П. Філософовим, який дає змогу зі значним ступенем детальності досліджувати динаміку земної кори неотектонічної та сучасної епох. Структурно-морфометричний аналіз ґрунтується на виявленні взаємозв'язків між тектонічними структурами, вертикальними рухами земної кори та еволюцією рельєфу [15, 16]. Останні дослідження у цьому напрямі підтверджують ефективність і доцільність застосування методу [5, 9, 14, 19]. Разом з тим існує низка обмежень і труднощів, що виникають під час застосування методики в регіонах з різними ландшафтно-кліматичними та структурно-тектонічними умовами. Зокрема, це стосується проведення структурно-морфометричних досліджень у гірськоскладчастих регіонах, оскільки початково метод був розроблений та застосований переважно для виявлення тектонічних структур платформ.

Одним із проблемних питань є адаптація методики структурної морфометрії до середовища ГІС та автоматизація процесу картографування рельєфу. Це пов'язане із значною трудомісткістю,

багатоетапністю картометричних побудов і проведенням великої кількості аналітико-математичних операцій. Вирішення цих питань потребує поєднання комплексу теоретичних та прикладних аспектів: пошуку нових методологічних підходів, застосування функцій просторового аналізу та моделювання. З цією метою адаптовано класичну методику структурно-морфометричного аналізу до середовища ГІС та визначено способи автоматизації картометричних операцій, що значно підвищує ефективність застосування структурної морфометрії для реконструкції новітнього тектогенезу, аналізу взаємозв'язків між ендегенними процесами, розвитком рельєфу та проявом небезпечних екзогенних процесів.

Дослідження проведено на прикладі Карпатського модельного полігона, що в адміністративному відношенні охоплює частину Свалявського, Мукачівського, Перечинського та Іршавського районів Закарпатської обл. Площа досліджень перевищує 300 км<sup>2</sup>, у географічному відношенні полігон розташований в басейні середньої течії р. Латориця. Структурно-формаційні одиниці в його складі належать до Зовнішніх і Внутрішніх Карпат, розмежованих Закарпатським глибинним розломом. Зовнішні Карпати включають Магурський та Рахівський покрови, Внутрішні Карпати – зони Пенінських і Мармароських скель, частину Закарпатського внутрішнього прогину, що покритий Вигорлат-Гутинським вулканічним пасмом [2]. Оскільки досліджуваний район знаходиться на межі двох великих структурних одиниць Карпатської гірськоскладчастої споруди, він характеризується складним структурно-тектонічним планом, тривалою історією геологічного розвитку, наявністю численних диз'юнктивних порушень і вулканічних структур. Активність тектонічних перетворень, неотектонічних вертикальних та горизонтальних рухів, які пов'язані з

підняттям гірськоскладчастих Карпат, продовжується й нині, що підтверджується постійною сейсмічністю та зумовлює значний розвиток небезпечних екзогенних процесів, які становлять загрозу для стійкості природно-техногенних систем і завдають численних матеріальних збитків. Детальніше вивчення й глибше розуміння складних взаємозв'язків ендегенних та екзогенних процесів, впливу їх на еволюцію ландшафтних комплексів не лише має теоретичну цінність, а й становить значний практичний інтерес. Вивченню неотектонічних процесів Карпат присвячено численні праці І.Д. Гофштейна, П.М. Цися, В.Г. Бондарчука, О.Г. Юркевича, В.Г. Кузнецової, Г.Т. Собакаря, В.І. Сомова, В.П. Палієнко та ін., у яких розглянуто загальні теоретичні основи неотектонічного розвитку Карпатської гірськоскладчастої споруди та її облямування [1, 3, 4, 10, 12, 13, 18, 20]. Однак виявлення локальних тектонічних структур і характеру їх еволюції залишається проблемним питанням.

В цьому аспекті структурно-морфометричний аналіз дає змогу проводити різномасштабні дослідження, визначаючи при цьому характер і амплітуди тектонічних рухів, їх спрямованість, циклічність та виявляючи тектонічні структури різних порядків. Дослідження неотектонічних процесів у Карпатському регіоні за допомогою класичної методики структурної морфометрії зі значним ступенем детальності проводяться вперше.

Структурно-морфометричний аналіз є одним із геоморфологічних, зокрема морфометричних, методів досліджень, що ґрунтуються на визначенні морфометричних (геометричних) показників рельєфу з подальшим графічним перетворенням і створенням математичних моделей, які інтерпретуються генетичною геоморфологією, геотектонікою та неотектонікою. За допомогою методу виявляють тектонічні структури різного масштабу, вертикальні рухи земної кори, встановлюють генетичний зв'язок між процесами геоморфогенезу і тектогенезу в новітній час. Структурно-морфометричний аналіз проводять із залученням середньо- та великомасштабних топографічних карт з якісним відображенням рельєфу, зокрема всіх його ерозійних форм: річок, ярів, балок, тальвегів сухих долин та ін., або з використанням детальних цифрових моделей рельєфу і векторної гідрографічної мережі. Класична методика структурної морфометрії полягає у створенні морфометричних карт порядків долин і вододільних ліній, карт базисних і вершинних поверхонь, карт різниці базисних поверхонь та різниці вершинних поверхонь суміжних порядків, карт різниці між однопорядковими вершинно-базисними поверхнями, карт залишкового рельєфу та асиметрії форм рельєфу. Ці побудови є основою для подальшої інтерпретації, оскільки характеризують

еволюцію рельєфу та його морфологію на окремих стадіях розвитку території упродовж новітнього етапу [16].

На сьогодні розробляють і впроваджують методи автоматизації класичних геоморфологічних методик, однак спочатку виконання структурно-морфометричних побудов й створення морфометричних карт вимагало багатоетапних та громіздких робіт із креслення, тому адаптація методики до сучасних програмних засобів є нагальною необхідною.

Для аналізу рельєфу та створення серії морфометричних і тектонічних карт вибрано геоінформаційну систему ArcGIS (ESRI), що має зручний багатофункціональний інструментарій та спеціалізовані модулі із можливостями просторового аналізу, картометричних побудов, перетворенням ізолінійних та ґрид-поверхонь, часово-просторового моделювання [17]. Загалом виконання структурно-морфометричного аналізу в середовищі ГІС має декілька етапів [5].

1. Векторизація топографічних карт, що включає оцифрування топографічних основ районних досліджень із відповідною векторизацією рельєфу. Виконують злиття окремих аркушів карт та їх прив'язку, але за наявності цифрових топографічних карт впровадження наступних етапів значно спрощується, оскільки виникає можливість використання автоматичного режиму функцій аналізу растрових зображень.
2. Створення геореляційної бази даних із відповідною організацією картографічної та атрибутивної інформації щодо долинної мережі та різногенетичних поверхонь рельєфу.
3. Побудова цифрової моделі рельєфу (є можливим використання функції *topogrid* (ArcInfo Workstation), що дає змогу розраховувати модель рельєфу, зважаючи як на просторове положення горизонталей, так і рисунок річкової мережі й інші гідрографічні об'єкти).
4. Побудова серії морфометричних карт та аналіз ізолінійних поверхонь і ґрид-поверхонь, що включає складання карт порядків долин (рис. 1) і вододільних ліній, карт базисних (рис. 2) і вершинних поверхонь, карт різниці базисних, вершинних поверхонь суміжних порядків, вершинних й базисних поверхонь одного порядку.
5. Виконання просторового аналізу та створення TIN-моделей з метою подальшого аналізу рельєфу та інтерпретації. Для побудови TIN-моделей, як правило, застосовують спеціалізований модуль *3D Analyst* і виконують інтерполяцію даних із використанням різних методів.

Наступні аналітичні операції з виконання ґрид-аналізу також використовують функціональні можливості спеціалізованих модулів

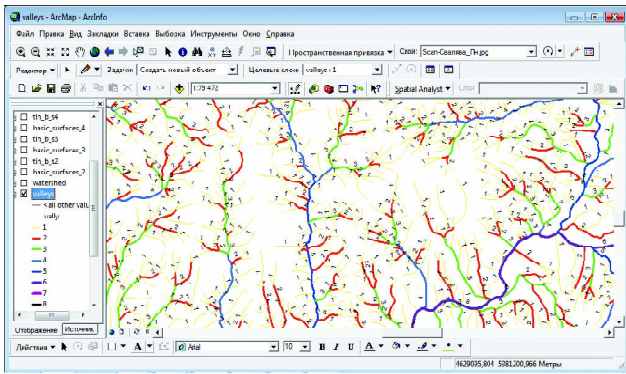


Рис. 1. Побудова карт порядків долин

3D Analyst та Spatial Analyst, зокрема, можливе проведення статистичного аналізу побудованих морфометричних поверхонь із отриманням даних щодо максимальних і мінімальних висот, їх розподілу та стандартного відхилення (рис. 3).

Одним із найголовніших етапів класичної методики структурної морфометрії є визначення неотектонічних і сучасних рухів земної кори, який полягає в обрахунку амплітуд вертикальних рухів у числовому еквіваленті, а також виявлення локальних структур, що для регіону Карпат є найактуальнішим. Для цього необхідні математичні операції, а саме віднімання, з різногенетичними поверхнями. Найінформативнішими є карти різниць базисних, вершинних і вершинно-базисних поверхонь. Віднімання цих поверхонь проводять за методикою П.О. Рижова [11], згідно з якою використовують властивості поверхонь топографічного порядку, а саме віднімають ізолінійні поверхні, графічно накладаючи одну на одну та обраховуючи різниці між значеннями гіпсометричних відміток ізоліній (ізобазит, ізогіпсобазит) у місцях перетину з подальшою інтерполяцією. Різниці базисних поверхонь створюють, графічно віднімаючи базисну поверхню вищого порядку із базисної поверхні нижчого порядку. Різниці вершинних поверхонь отримують, графічно віднімаючи вершинну поверхню нижчого із вершинних поверхонь вищих порядків. Найбільшу інформа-

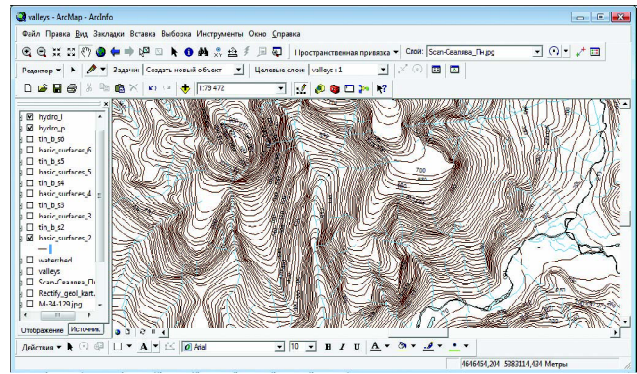


Рис. 2. Ізолінійна карта базисної поверхні 2-го порядку

тивність мають карти різниці вершинно-базисних поверхонь, за якими аналізують процеси ерозії та денудації, що суттєво впливають на значення вертикальних рухів. На основі аналогових даних процес графічного віднімання потребує багато часу на створення копій різногенетичних поверхонь, однак із використанням програмних можливостей ГС з'явилася можливість напівавтоматичного проведення графічних операцій. Для створення карт різниць аналізують точки перетину ізоліній, обраховують різницю відміток і отримують відповідну атрибутивну інформацію. Однак в умовах гірськоскладчастих Карпат, з різко розчленованим рельєфом та абсолютними відмітками понад 1000 м, реалізація цього етапу морфометричного аналізу є утрудненою і потребує автоматизації відповідних картометричних побудов.

З цією метою створено програмний модуль, за допомогою якого карти різниць будують в автоматизованому режимі. Скрипт написаний мовою програмування python 2.7.2 і з використанням модулів arcpy, sys, os. У програмному модулі також реалізована пакетна обробка даних, що дає змогу віднімати декілька ізолінійних поверхонь одночасно. Для зручності у використанні модуль можна підключити до середовища ArcGis 10.1 і вищих версій як інструмент ArcToolbox.

Нижче наведено алгоритм роботи програмного модуля:

- 1) завантаження вхідних даних (ізолінійних поверхонь, над якими слід провести процедуру віднімання);
- 2) знаходження перетинів ізолінійних об'єктів та обрахунок різниць між числовими значеннями відповідних ізоліній;
- 3) запис різниць в атрибутивну таблицю;
- 4) видалення непотрібних полів із шейп-файлу;
- 5) формування повних імен вихідних файлів (TIN, .shp);
- 6) виведення результату у вигляді shp-файлу (рис. 4) та TIN-моделей (рис. 5). Використання модуля скорочує час виконання та зменшує матеріально-технічні витрати, оскільки

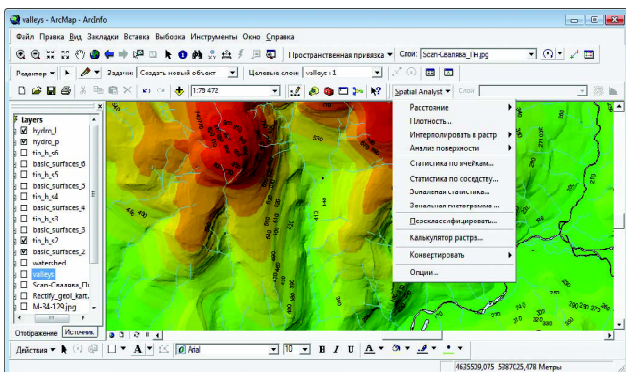


Рис. 3. TIN-модель базисної поверхні 2-го порядку

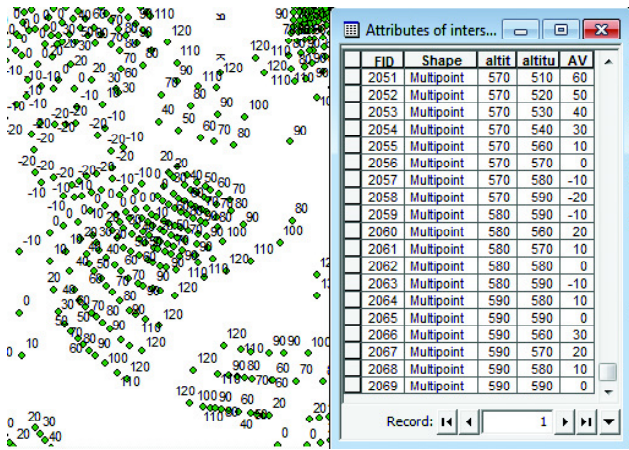


Рис. 4. Вихідний shp-файл сукупності точок різниць з атрибутивною таблицею

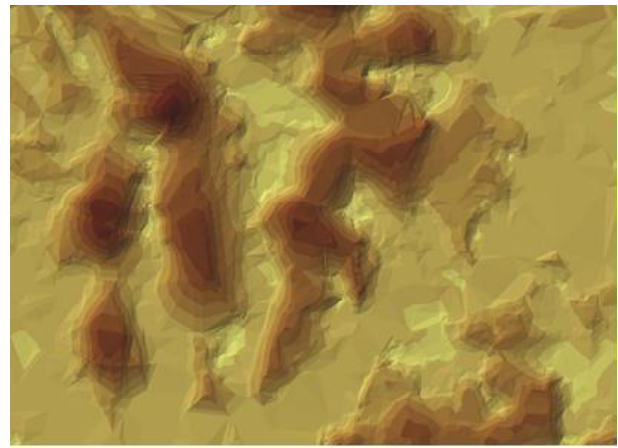


Рис. 5. Вихідна TIN-модель карти різниць

відшукування близько 2000 тис. місць перетинів та обрахунок різниць триває декілька секунд, а просторова чіткість місць перетинів значно підвищується.

**Висновки.** Наведено загальні положення класичної методики структурної морфометрії та визначено можливість її використання для аналізу морфогенезу і тектогенезу гірськоскладчастих зон. Схарактеризовано основні етапи структурно-морфометричного аналізу на прикладі Карпатського модельного полігона та продемонстровано можливість адаптації методу до середовища ГІС. Із застосуванням мови програмування python 2.7.2 і модулів arcpy, sys, os створено програмний модуль, за допомогою якого можна автоматизувати операції структурно-морфометричних побудов, зокрема створити карти різниць різногенетичних поверхонь рельєфу та, відповідно, карти залишкового рельєфу, локального змиву та ін. Це дасть змогу детально і ґрунтовно досліджувати взаємозв'язки між неотектонічними перетвореннями та процесами геоморфогенезу різноструктурних зон.

1. *Бондарчук В.Г.* Тектоника Карпат. – Киев: Изд-во АН УССР, 1962. – 116 с.
2. *Геодинамика Карпат* / [Круглов С.С., Смирнов С.Е., Спитковская С.М. и др.]; под ред. В.В. Глушко, С.С. Круглова. – Киев: Наук. думка, 1985. – 136 с.
3. *Гофштейн И.Д.* Неотектоника Карпат. – Киев.: Изд-во АН УССР, 1964. – 184 с.
4. *Гофштейн И.Д.* Вивчення сучасних рухів земної кори в Карпатах / Гофштейн И.Д., Сомов В.І., Кузнецова В.Г. – К.: Наук. думка, 1971. – 127 с.
5. *Іванік О.* Застосування класичних методик структурно-морфометричного аналізу для реконструкції новітнього тектогенезу на основі ГІС / О. Іванік, Л. Тустановська // Вісн. Київ. нац. ун-ту. Сер. Геологія. – 2011. – Вип. 53. – С. 4–7.
6. *Корчуганова Н.И.* Неотектонические методы поисков полезных ископаемых. – М., 2001. – 212 с. + 4 вкл. – (МПР РФ, Геокарт, МГГА).

7. *Николаев Н.И.* Неотектоника и ее выражение в структуре и рельефе территории СССР. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 392 с.
8. *Николаев Н.И.* Новейшая тектоника и геодинамика литосферы – М.: Недра, 1988. – 491 с.
9. *Обнаружение и исследование зон новейших движений земной коры инструментами ГИС.* – [Електрон. ресурс] / [Чернова И.Ю., Хасанов Д.И., Жарков И.Я. и др.] // Arcreview. – 2005. – № 1 (32). – Режим доступу: [http://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1833&SECTION\\_ID=49](http://www.dataplus.ru/news/arcreview/detail.php?ID=1833&SECTION_ID=49).
10. *Палиенко В.П.* Новейшая геодинамика и ее отражение в рельефе Украины. – Киев: Наук. думка, 1992. – 116 с.
11. *Рыжов П.А.* Геометрия недр: [учебник для горных вузов и фак.]; изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1964. – 500 с.
12. *Собакарь Г.Т.* Современная динамика и структура земной коры Карпат и прилегающих территорий / Собакарь Г.Т., Сомов В.И., Кузнецова В.Г. – Киев: Наук. думка, 1975. – 128 с.
13. *Сомов В.И.* Современная направленность развития тектонических структур Карпато-Балканского региона (по данным инструментальных исследований) // Геофиз. журн. – 1990. – Т. 12, № 6. – С. 39–47.
14. *Тустановська Л.* Еволюція рельєфу Канівського Придніпров'я на основі аналізу базисних і вершинних поверхонь // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Сер. геол. – 2011. – Вип. 54. – С. 11–15.
15. *Философов В.П.* Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1960. – 93 с.
16. *Философов В.П.* Основы морфометрического метода поисков тектонических структур.– Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 232 с.
17. *Хромых В.В.* Цифровые модели рельефа: учеб. пособие / В. В. Хромых, О. В. Хромых. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. – 178 с.
18. *Цись П.М.* Геоморфология УРСР. – Львів: Вид-во Львів. ун-ту, 1962. – 224 с.
19. *Шевчук В.В.* Реконструкція новітнього тектогенезу Канівського Придніпров'я на основі структурно-морфометричних побудов / Шевчук В.В., Іванік О.М., Тус-



- тановська Л.В. // Геодинаміка. — № 2. — 2011. — С. 338–340.
20. Юркевич О.И. Современные движения, сейсмичность и напряженность Карпат // Геодезия, картография и аэрофотосъемка. — 1992. — № 54. — С. 86–94.
21. Burbank D.W. Tectonic geomorphology / D.W. Burbank, R.S. Anderson. — Santa Cruz: Blackwell Sci., 2001. — 274 p.
22. Zuchiewicz W. On different approaches to neotectonics: A Polish Carpathians example // Episodes. — 1991. — Vol. 14, N 2. — P. 116–124.

Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка, Україна  
E-mail: ivanik@univ.kiev.ua

Надійшла до редакції 01.10.2013 р.

Е.М. Іванік, Т.В. Андриец, С.В. Муравко

#### **СТРУКТУРНО-МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ В СРЕДЕ ГИС ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ГОРНОГО РЕЛЬЕФА (НА ПРИМЕРЕ КАРПАТСКОГО МОДЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА)**

Проанализированы главные положения классической методики структурной морфометрии и определена возможность ее применения для исследования морфогенеза и тектогенеза горноскладчатых областей. Продемонстрирована возможность адаптации классической методики к среде ГИС. Выполнена обработка морфометрических данных и построена серия морфометрических карт с использованием ГИС-анализа и пространственного моделирования для Карпатского модельного полигона. Разработан программный модуль, который позволяет автоматизировать операции структурно-морфометрических построений.

**Ключевые слова:** структурная морфометрия, Карпаты, неотектоника, ГИС.

О.М. Іванік, Т.В. Андриєць, С.В. Муравко

#### **STRUCTURE-MORPHOMETRIC ANALYSIS IN GIS FOR MOUNTAIN RELIEF MAPPING (BASED ON THE CARPATHIAN MODEL POLIGON)**

Considered here are the basic principles of the classical technique of structural morphometry to determine its application in morphogenesis and tectogenesis studies of mountain regions. The possibility of the technique adaptation to GIS has been shown. Morphometric data processing and morphometric mapping with the use of GIS-analysis and spatial modeling of the Carpathian polygon have been carried out. A program module which allows to automatize structure-morphometric mapping is created.

**Keywords:** structural morphometry, Carpathians, neotectonics, GIS.