

## ЦИФРОВА МОДЕЛЬ РЕЛЬЄФУ В ГЕОГРАФІЧНОМУ Й ГЕОІНФОРМАЦІЙНОМУ ПРОСТОРІ

*Білоус Л.Ф*

Розглядаються проблеми просторового моделювання. Пропонується методика просторового моделювання рельєфу засобами ГІС. Цифрова модель рельєфу розглядається як джерело синтезу інформації про особливості ландшафтної організації територій.

Ключові слова: цифрове моделювання, цифрова модель рельєфу (ЦМР), GRID-модель, TIN-модель, класифікація ЦМР, позиційно-динамічна ландшафтна територіальна структура.

Цифрове моделювання - це процедура створення тривимірних фотореалістичних візуалізацій (3D-моделей) територій та об'єктів методами комп'ютерної графіки. Під цифровою просторовою моделлю об'єкта слід розуміти певну форму представлення даних та засіб їх структурного опису, що дозволяє «обчислювати» (відновлювати) об'єкт шляхом інтерполяції, апроксимації або екстраполяції [1]. 3D-моделі полегшують планування, контроль і прийняття рішень у багатьох галузях людської діяльності. Тривимірні фотореалістичні візуалізації територій, як складова геоінформаційних систем (ГІС) та результат просторового аналізу даних, відкриває широкі можливості аналізу розподілу забруднень, актуального й прогнозного моделювання територіальної диференціації деструктивних процесів, виявлення родовищ корисних копалин, обґрунтування проектів збалансованого розвитку регіонів.

Цифрова модель рельєфу (ЦМР) (digital terrain model, DTM; digital elevation model, DEM; Digital Terrain Elevation Data, DTED) - це растрове представлення топографічної поверхні, в якій кожен піксел (елементарна складова) растру може мати лише одне значення висоти. ЦМР є, як правило, обов'язковою складовою будь-якої ГІС. Забезпечує можливість вирішення широкого спектру завдань, пов'язаних з: енергією рельєфу, зокрема, ерозійною, зсувною, дефляційною й т.д.; обчисленням обсягів складних тіл (відвалів, ярів, води на ділянці ріки й т.д.); топологією місцевості, а, відповідно, й територіальними структурами геосистем; системою екомережі.

Проблеми просторового моделювання рельєфу та аналізу ЦМР вирішуються в інтеграційному науковому полі геоінформатики, геостатистики та географії. В залежності від типу вихідних даних та методики їх обробки можна виділити два кардинально відмінних способи одержання ЦМР. Перший спосіб базується на використанні даних та методів дистанційного зондування, фотограмметрії та радарграмметрії. У цій області існують певні методики та доробки, точність результатів яких досить переконлива. Проте, трудомісткість методів реалізації таких методик, їх специфічність та недоступність відповідного програмного забезпечення перешкоджають широкому їх поширенню. Другий спосіб - побудова моделей рельєфу шляхом аналізу даних, отриманих в процесі дегіталізації аналогових

джерел інформації (топографічних карт). Цей підхід не новий, має свої сильні і слабкі сторони. Головним його недоліком, власне, є трудомісткість процесу створення бази вихідних даних. А складність полягає в обґрунтуванні методики побудови ЦМР для певної території (гірської, рівнинної).

Методи моделювання ЦМР за даними, отриманими в процесі оцифровки аналогових джерел можуть бути різними. Насамперед, варто згадати моделі, представлені у вигляді триангуляційних нерегулярних мереж (TIN - Triangulated Irregular Network), побудованих на основі триангуляції Делоне. Як приклад можна привести роботу Р. Латтуада й Дж. Рейпера [7]. Такі моделі використовуються в проектах дослідницькою групою GeoFrance3D [9]. Крім цього, TIN-моделювання може застосовуватись при генерації додаткових даних при їхній недостатній кількості для коректної інтерполяції. Приклад подібної техніки представлений у роботі Д. Хейцингера й Х. Кагера [5] про одержання коректних ЦМР із використанням бази вихідних ізолінійних даних. Перевагою триангуляційної моделі є те, що в ній відсутні будь-які перетворення вихідних даних. З одного боку, це суперечить можливості використовувати такі моделі (через їх нерегулярний характер) для послідуного детального аналізу, але, з іншого боку, дослідник завжди знає, що в цій моделі немає ніяких привнесених помилок, якими грішать моделі, отримані при використанні інших методів інтерполяції. Моделі, отримані при інтерполяції такими методами, як, наприклад, сплайн або кригінг - це регулярні матриці даних, до яких, власне, може застосовуватись весь арсенал способів аналізу поверхонь. Цікавими й фундаментальними в цій області є роботи М. Хатчинсона [6], П. Суаля [8]. У цих роботах розглядаються не тільки питання аналізу моделей рельєфу, але також обговорюються варіанти одержання так званих «гідрологічно коректних» моделей рельєфу.

У російськомовній та українськомовній науковій літературі питання, пов'язані зі способами моделювання й оцінкою точності отриманих ЦМР, а також просторового їх аналізу - слабо освітлені. Тому, вбачається за необхідне представити методику моделювання й аналізу ЦМР за допомогою методів ГІС, яка б максимально задовольняла вимоги точності відтворення геоморфологічних ситуацій. Нами для апробації й представлення методики моделювання ЦМР обрано басейн річки Інгулець.

Загалом, вихідні дані про рельєф, що створюються за топографічною основою можуть бути представлені в ГІС у вигляді:

- регулярно розташованих точок по прямокутних, трикутних, шестикутних (гексагональних) сітках;
- точок, отриманих в результаті дегіталізації горизонталей;
- точок, отриманих в процесі дегіталізації структурних ліній базисного й вершинного типів.

За умови використання регулярно оцифрованих даних для побудови ЦМР, остання буде характеризуватись стохастичністю, що проявлятиметься у втраті інформації через високу ймовірність ігнорування найбільш характерних точок каркасу рельєфу. До того ж при побудові даної моделі проблему складає підбір у відповідності з типом рельєфу густоти регулярної сітки. Принагідно зазначити, що

для рівнинного рельєфу при масштабі карти 1:50000 для побудови відносно коректної ЦМР необхідно записати в пам'ять комп'ютера 400 точок на 1км<sup>2</sup> [2]. Використання такого об'єму даних призведе до формування надзвичайно великої за розміром моделі, подальше використання якої для просторового структурного аналізу буде досить проблематичним. При незначному ж розрідженні сітки точок видозмінюються всі морфометричні показники рельєфу, а його морфологічний образ стає невпізнаним. За умови використання вихідних даних, що отримані в результаті дегіталізації горизонталей, ймовірність отримання достовірної моделі рельєфу зростає, однак їх недостатність доводиться відсутністю інформації в ЦМР в зонах вододільних плато, пологих схилів, терас та заплав. Максимально достовірною ЦМР буде в результаті комбінованого використання для її побудови даних отриманих в процесі дегіталізації структурних ліній базисного й вершинного типів та горизонталей. Саме такий спосіб підготовки вихідних даних був обраний нами для побудови ЦМР басейну річки Інгулець.

Вибір програмного середовища, визначення специфіки організації вихідних даних та обґрунтування методики їх інтерполяції здійснювались в ході ітеративного комп'ютерного експериментування та інтелектуального експертування методом верифікаційного профілювання, що допомагав виявити недостатність вихідних даних та недосконалість методик їх інтерполяції. В результаті був зроблений вибір на користь програми ArcInfo й методу топогрід-інтерполяції.

Загалом, тривимірних ГІС на ринку програмного забезпечення не так і багато. Найпершою й відразу вдалою спробою створення такої системи є розробка фірми ERDAS за назвою Virtual GIS. Причому сама фірма, не будучи ГІС-розробником, мала намір розширити можливості своєї системи обробки растрових геокодованих зображень (наприклад, аерофото- або космічних знімків). Потім практично одночасно «законодавці мод» в області двовірних ГІС, американські компанії ESRI й Mapinfo, випустили програмні модулі відповідно за назвою 3D Analyst і Vertical Mapper для своїх базових продуктів ArcView і Mapinfo. Вітчизняні розробники ГІС «Нева», «Панорама», «Око», «Візіком-Київ», «Рельєф-процесор» також запропонували модулі тривимірного моделювання. Однак, найбільш потужною й повнофункціональною тривимірною системою є ГІС Arcinfo, що, в принципі, не розділяє світ на тривимірний і двовірний та однаково добре працює зі всіма об'єктами.

Існує багато підходів до моделювання цифрових даних, введених в ГІС. Всі їх умовно можна розділити на дві групи за способом регулярного чи нерегулярного представлення інформації в ЦМР. Регулярну матрицю значень параметру (в даному випадку висоти) досліджуваного об'єкта чи явища, отриману при інтерполяції вхідних даних на деяку сітку квадратів, в вузлах якої задані значення показника досліджуваного елемента, називають ґрид-моделлю (GRID) [3, 4]. Побудувати GRID-модель можна за допомогою таких методів аналізу просторових даних, як сплайн (Spline Interpolation), тренд (Trend Surface Interpolation), кригінг (Kriging Interpolation); зворотня зважена відстань (Inverse Distance Weighted), топогрід (Topogrid Interpolation). Інтерполяція вихідних даних на нерегулярну сітку носить назву TIN (Triangulated Irregular Network)-моделі, що представлена системою

нерівносторонніх трикутників, які не перетинаються, а їх вершинами є вихідні опорні точки (дані). ЦМР представлена багатогранною поверхнею, кожна грань якої є елементарним осередком аналізу. Реалізацію побудови TIN-моделі, забезпечує алгоритм триангуляції Делоне [4]. Результат триангуляції - лінійна нерегулярна мережа, система трикутників, що не перетинаються, вершинами яких є реальні дані. Рельєф у цьому випадку представляється багатогранною поверхнею, кожна грань якої описується або лінійною функцією (полідральна модель), або поліноміальною поверхнею, коефіцієнти якої визначаються за значеннями у вершинах граней трикутників.

Апробація GRID-модельювання, результатом якого є регулярне дискретне представлення інтерпольованих даних та TIN-модельювання, результатом якого є неперервне нерегулярне представлення інтерпольованих даних в середовищі ArcView довела некоректність отриманих результатів, що чітко проявлялась, зокрема, у місцях базису ерозії істотно вираженою погорбованістю. Програмним середовищем, що забезпечує врахування при інтерполяції базисних лінійних

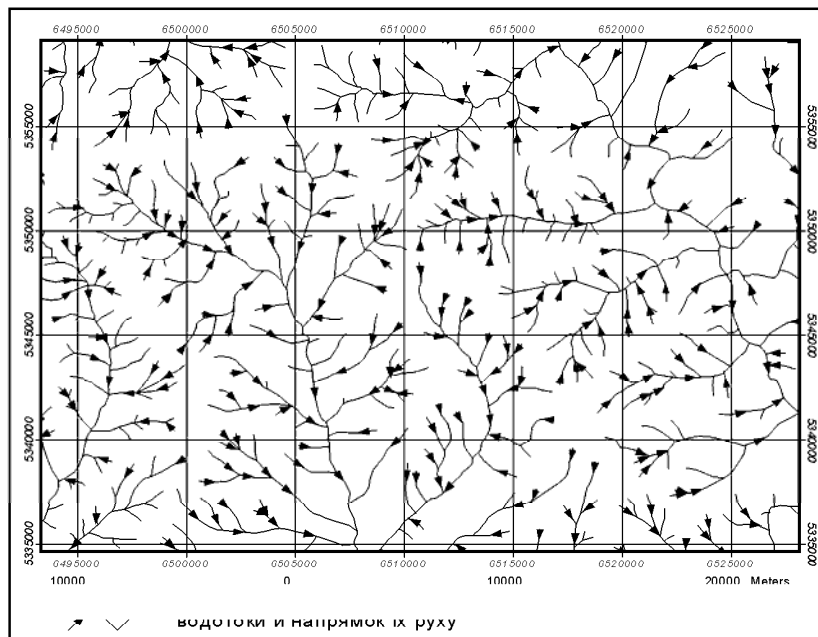


Рис.1. Орграф базисних структурних елементів рельєфу

структурних елементів рельєфу, а отже й побудову гідрологічно коректної ЦМР в ArcInfo. Саме в ArcInfo існує можливість застосування методу топогрід-інтерполяції, який спеціально створений для побудови, власне, гідрологічно коректної ЦМР. Для того, щоб застосувати вказаний метод необхідно відповідним чином організувати систему вихідних даних. Складовими цієї системи є: дуги, точки, полігони, та відповідні атрибути. Дуги - це результат дегіталізації

## ЦИФРОВА МОДЕЛЬ РЕЛЬЄФУ В ГЕОГРАФІЧНОМУ Й ГЕОІНФОРМАЦІЙНОМУ ...

горизонталей і елементів яружно-балкової та долинно-річкової систем, точки представлені висотними відмітками, що отримані, в даному випадку, з карт масштабів, 1:50000, 1:25000, полігони - це озера, водосховища, ставки. Занесення до бази вихідних даних вищевказаних складових характеризувалось деякою специфікою та етапністю. Зокрема, застосування функції топогريد-інтерполяції вимагає організації дуг, що представляють базисні лінійні елементи у вигляді орграфу (рис.1), направленість кожного ребра якого відповідає напрямкові руху відповідного водного потоку. Створення такої графової моделі водотоків - досить трудомісткий процес, що є програмно контрольованим. В даному випадку при побудові графової моделі водотоків басейну річки Інгулець контроль точності цифрування здійснювався в середовищі програми Marinfo.

Дегіталізація горизонталей здійснювалась за цифровими топографічними картами масштабу 1:200000 в інтерактивному режимі дисплейного цифрування з застосуванням програмного середовища Marinfo, з активізацією такої його функції як SPLIT (вузли), що допомогла уникнути небажаних розривів дуг. В результаті було створено ще одну складову бази вихідних даних, фрагмент якої представлено на рис.2.

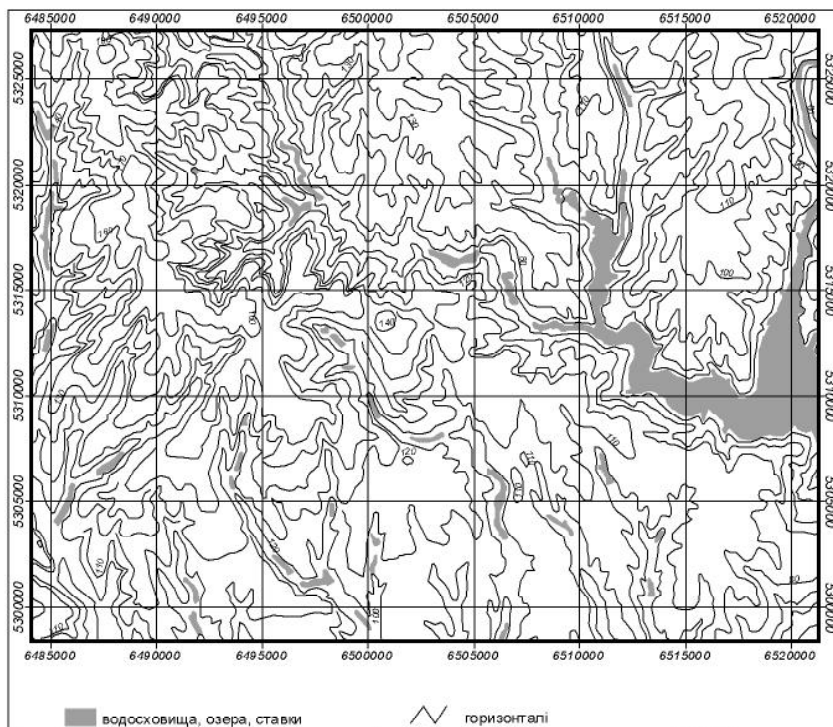


Рис.2. Карта елементів бази вихідних даних моделювання ЦМР

На цьому ж рисунку відображено й полігональні об'єкти (озера, водосховища, ставки), що є складовими бази вихідних даних просторового моделювання, для яких актуальною є активізація локальних методів топогريد-інтерполяції.

Оцифровка базисних й вершинних структурних елементів рельєфу (рис.3), в даному випадку, здійснювалась із залученням цифрових моделей топографічних карт масштабів 1:50000, 1:25000 та цифрових моделей тальвегів і вододілів.

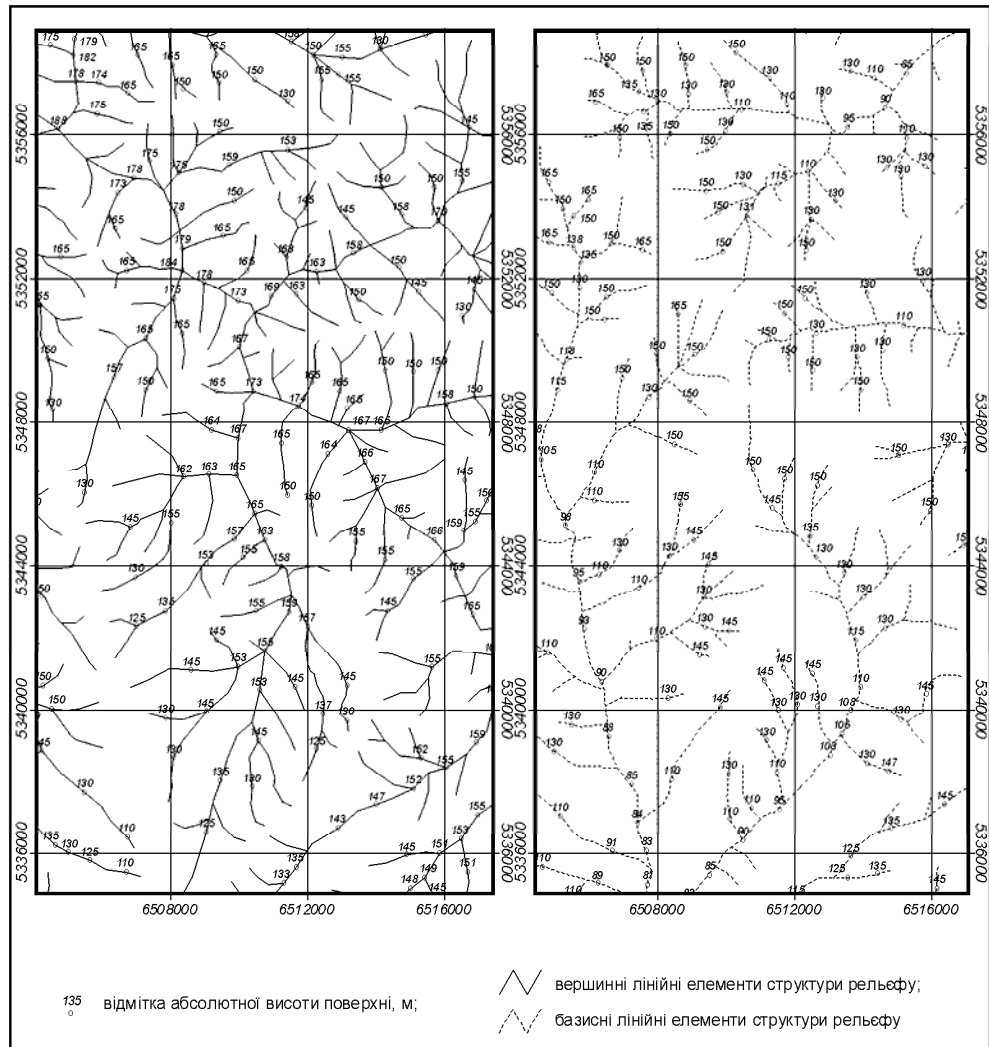


Рис.3. Базисні й вершинні точки, як елементи бази вихідних даних

## ЦИФРОВА МОДЕЛЬ РЕЛЬЄФУ В ГЕОГРАФІЧНОМУ Й ГЕОІНФОРМАЦІЙНОМУ ...

Підготовка належним чином організованої бази вихідних даних що відбувалась в програмному середовищі MapInfo з використанням топографічних геокодованих растрових карт різних масштабів (1:25000; 1:50000; 1:100000; 1:200000) й складовими елементами якої є: оцифровані горизонталі (рис.2), точки вершинних й базисних структурних елементів рельєфу (рис.3), орграф базисних лінійних елементів (рис.1), цифрова модель ставків, озер, водосховищ, - дозволила перейти безпосередньо до процедури просторового моделювання рельєфу.

Остання передбачає виконання задач: 1) комп'ютерного експериментування та інтелектуальної експертизи, спрямованих на корегування бази вихідних даних, зокрема в зв'язку з наявністю так званих «пікових» значень, які, досить часто, є помилковими та в зв'язку з недостатньою щільністю вихідних даних; 2) створення ЦМР; 3) верифікації достовірності результату.

Виявлення помилкових значень бази вихідних даних в програмному середовищі ArcInfo забезпечує така функція як TOLERANCES, що базується на статистичному аналізі стандартного відхилення, розрахунок якого контролюється введеними максимальними та мінімальними показниками абсолютної висоти поверхні.

Важливе значення при моделюванні ЦМР має виявлення та вирішення проблеми недостатності вихідних даних, проявом якої, як правило, характеризуються виположені ділянки місцевості (тераси, долини річок, низовини, привододільні плато), та ті, які мають невеликий кут нахилу схилів. Її ігнорування призводить до появи в ЦМР GRID-клітинок, що не мають значень висоти, а отже і не беруть участі в наступному просторовому аналізі ЦМР та спричиняють розрив континуальності похідних цифрових інформаційних моделей.

Для того, щоб коректно виділити з бази вихідних даних області з недостатньою їх щільністю, на основі не лише візуальних ознак, необхідно застосовуючи методику топогрід-інтерполяції, побудувати попередню ЦМР та створити за нею просторову модель ухилів, з якої вибрати клас таких, що характеризуються ухилом меншим за  $0^\circ$  і створити його векторну модель. Останню накласти на цифрові моделі карт, що представляють базу вихідних даних та на растрові основи геокодованих топографічних карт для введення додаткових даних, котрі забезпечать вирішення проблеми створення коректної й безперервної в інформаційному відношенні ЦМР. Нами, при вирішенні проблеми щільності вихідних даних, було зроблено 3 ітерації доповнення їх бази. Запропонована на рис.4 карта відображає території, що представляли інтерес при першій ітерації вдосконаленні бази вихідних даних просторового моделювання.

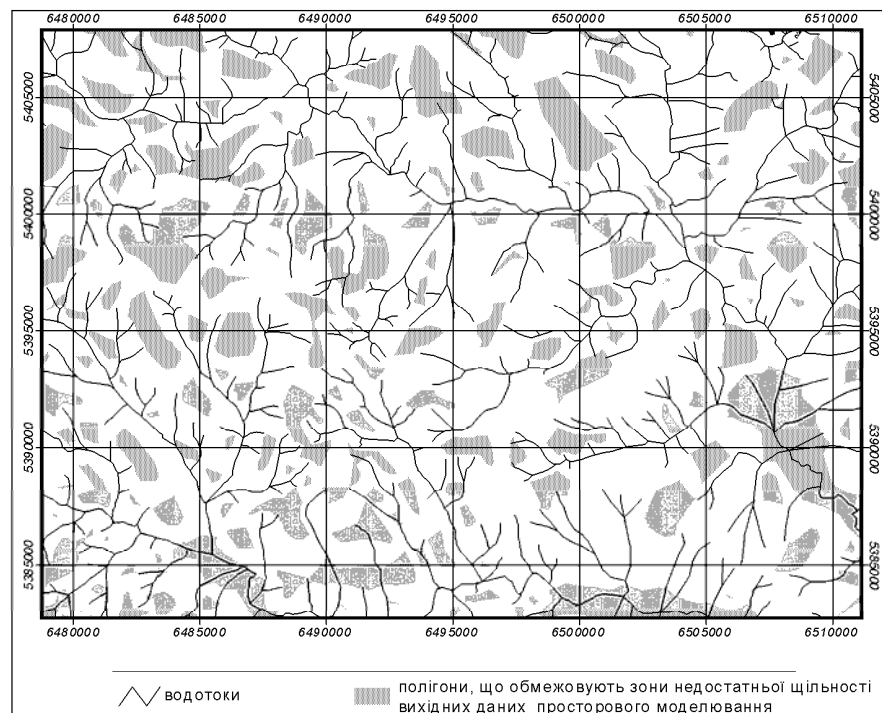


Рис.4. Карта аресалів з недостатньою щільністю вихідних даних

Досягти максимальної точності передачі рельєфу при застосуванні функції топогрід-інтерполяції, можливо було лише за умови бачення всіх об'єктів, що потребують корекції так званою «локальною» інтерполяцією. Нами ж в якості таких об'єктів визначені лише елементи гідрографії. А тому, вбачалось за необхідність уточнення ЦМР триангуляційним методом, який використовуючи дані, закладені в створеній ЦМР та реальні дані, отримані в результаті дегіталізації елементів топографічних карт, дозволив провести відповідну корекцію ЦМР. Адже саме метод триангуляції дозволяє перетворити дискретний масив значень висот GRIDa в неперервний та відобразити рельєф в межах точності вихідної інформації (первинних даних), яка, як зазначалось раніше, зберігається в вершинах трикутних площин, що піддаються інтерполяції. Перевірка уточненої просторової моделі на коректність методом профілювання та інтелектуального експертування показала добрий результат.

Ретельна підготовка бази вихідних даних й оригінальна методика моделювання, а саме: створення первинної GRID-моделі рельєфу з застосуванням методу топогрід-інтерполяції, її поточнення із застосуванням TIN-інтерполяції й послідує перетворення її на GRID-модель для можливостей просторового аналізу, - дозволили отримати достовірну й багатогранну з науково-прикладної точки зору ЦМР (рис.5).



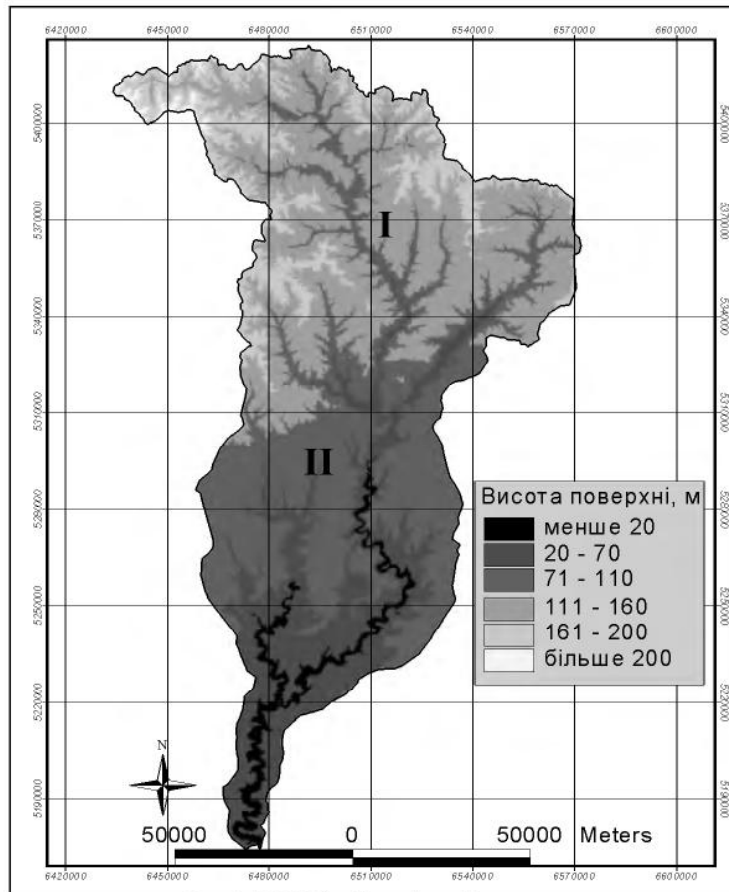


Рис.5. ЦМР басейну річки Інгулець

Вивчення й пізнання загальних особливостей ЦМР, а отже й рис геоморфологічної та ландшафтної будови басейну річки Інгулець здійснювалось нами в зв'язку з класифікацією даних що містяться в просторовій моделі за методом середнього квадратичного відхилення. Величина середнього арифметичного значення висоти, що рівна 110 метрам розділила всі дані ЦМР на 2 масиви. В результаті чого досить чітко на відкласифікованій ЦМР прослідковується межа між височинним та зниженим рельєфом Східно-Європейської полігенної рівнини в межах басейну річки Інгулець, а точніше між Придніпровсько-Приазовською областю цокольних пластово-денудаційних височин та пластово-аккумулятивних підвищених рівнин (I на рис.5), а саме підобластю Центрально-Придніпровської денудаційної рівнини та Причорноморською областю пластово-

аккумулятивних та пластово-денудаційних низовинних рівнин, а саме підобластю Північно-Причорноморської денудаційної рівнини (II на рис.5).

Послідуюча класифікація за методом середньоквадратичного відхилення, виділених частин (I та II) також забезпечила можливість бачення певних закономірностей.

Зокрема, та частина басейну річки Інгулець, що знаходиться в Придніпровсько-Приазовській області цокольних пластово-денудаційних височин та пластово-аккумулятивних підвищених рівнин, для якої характерним є інтенсивний прояв ерозійних процесів, визначена нами як Верхньоінгулецький басейновий регіон, в результаті класифікації також поділилась на 2 масиви значень. Один з них відповідає Придніпровській денудаційно-аккумулятивній підвищеній рівнині (діапазон висот 240-100 метрів), інший - перехідній рівнині (діапазон висот 180-60 метрів), а з точки зору фізико-географічного районування України [97], відповідно Південній області Придніпровської височини та області Південних відрогів Придніпровської височини. Класифікація останніх також дозволила виділити декілька груп значень ЦМР. Картографічне відображення результатів класифікації області південних відрогів Придніпровської височини в межах басейну (рис. 6) підтвердило припущення про те, що виділені групи об'єктів співвідносяться з певними геоморфологічними рівнями, які можуть бути інтерпретовані як

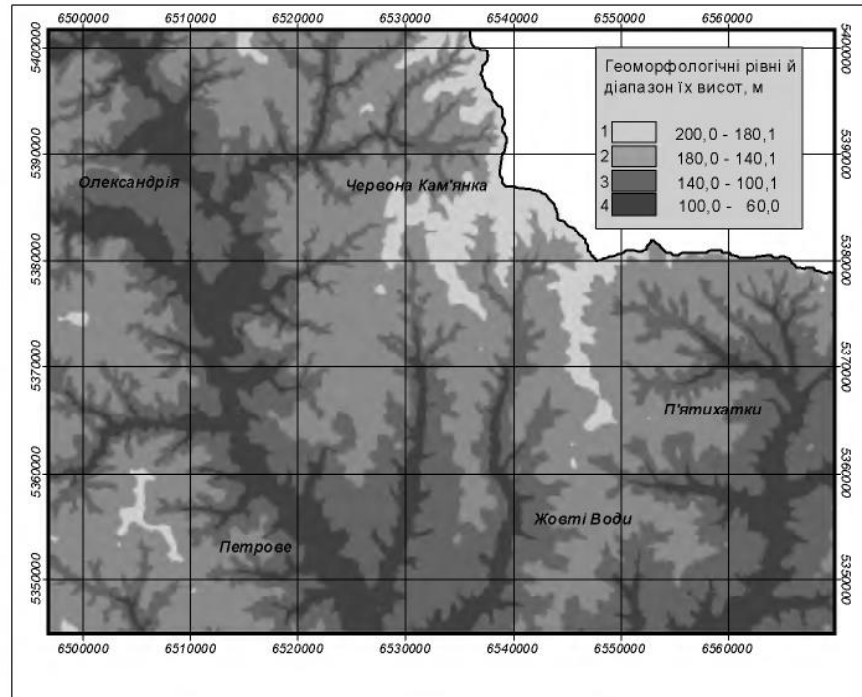


Рис.6. Ландшафтні яруси Верхньоінгулецького басейнового регіону

ландшафтні яруси позиціно-динамічної ландшафтно-територіальної структури, що різняться за співвідношенням факторів ландшафтно-динаміки, зумовлених ярусною будовою рельєфу (геоморфологічними рівнями), стадійністю рельєфоутворення і осадконакопичення. Зокрема в результаті класифікації ЦМР області південних відрогів Придніпровської височини виділились наступні ландшафтні яруси: елювіальний вододільно-височинний денудаційно небезпечний; елювіальний підвищено-рівнинний ерозійно небезпечний; схиловий транселювіально-аккумулятивний; алювіально-делювіальний яружно-балково-долинно-річковий, що відповідно під індексами 1, 2, 3 і 4. представлені на рис.6.

Загалом, побудована за викладеною методикою ЦМР здатна забезпечити відповідною інформацією конструктивний аналіз території будь-якої проблемної орієнтації, а тому її цілком обґрунтовано слід віднести як до суто наукового, так і до науково-виробничого інформаційного ресурсу. Висока достовірність ЦМР є основною передумовою обґрунтування результативних методик комп'ютерного аналізу її структури, синтезу інформації про ландшафтні закономірності організації територій та господарські особливості їх використання.

#### **Список літератури:**

1. Мусин О.Р. Цифровые модели для ГИС // Информационный бюллетень. ГИС-Ассоциация. - 1998.- №4 . - С. 30-36.
2. Черванев И.Г. Структура рельефа и ее влияние на структуру ландшафта // Физ.география и геоморфология. 1983. - Вып.30. - С.104-107.
3. ARC/INFO Starter KIT, руководство пользователя, версия 3.4D Plus. Environmental Systems Reseach Institute Inc. 1992.
4. ArcView Spatial Analyst – Environmental Systems Research Institute, Inc., New York, USA, 1996.
5. Heitzinger D., Kager H. Hochwertige Gelandemodelle aus Hohenlinien durch wissensbasierte Klassifikation von Problemgebieten // Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation. 1999. N 1, P. 29-40.
6. Hutchinson M.F. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models// [http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA\\_FE\\_CD-ROM/sf\\_papers/hutchinson\\_michael\\_dem/local.html](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/hutchinson_michael_dem/local.html)
7. Lattuada R., Raper J. Applications of 3D Delaunay triangulation algorithms in geoscientific modeling // [http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA\\_FE\\_CD-ROM/sf\\_papers/lattuada\\_roberto/paper.html](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/sf_papers/lattuada_roberto/paper.html).
8. Soille P. Morphological image analysis. Springer-Verlag, 1999.
9. <http://www2.brgm.fr/geofrance3d/>

**Билоус Л.Ф.** Цифровая модель рельефа в географическом и геоинформационном пространстве  
Рассматриваются проблемы пространственного моделирования. Предлагается методика пространственного моделирования рельефа средствами ГИС. Цифровая модель рельефа рассматривается как источник синтеза информации об особенностях ландшафтной организации территорий.

**Ключевые слова:** цифровое моделирование, цифровая модель рельефа (ЦМР), GRID-модель, TIN-модель, классификация ЦМР, позиционно-динамическая ландшафтная территориальная структура.

#### **Bilous L.F. Digital terrain elevation data in geographical and geoinformation space**

The problems of spatial modeling are considered. The technique of spatial modeling of a relief by means GIS is offered. The Digital Terrain Elevation Data is examined as a source of synthesis of the information about features of landscape organization of territories.

**Key words:** digital modeling, Digital Terrain Elevation Data, GRID-model, TIN-model, classification, landscape-territorial structure