

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет _____ Магістерської
підготовки
Кафедра інформаційних
технологій

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Побудова цифрової моделі рельєфу дна водно-озерного об'єкту з використанням ГІС-технологій»

Виконав студент 2 курсу групи
МІС-18 спеціальності 122
Комп'ютерні науки

Древаль Вадим Миколайович

Керівник к.геог.н., доц.
Коваленко Людмила Борисівна

Рецензент д.ф.-м.н., проф.
Ковальчук Володимир
Володимирович

АНОТАЦІЯ

на магістерську роботу «Побудова цифрової моделі рельєфу дна водно-озерного об'єкту з використанням ГІС-технологій»,
студента Древаля Вадима Миколайовича

В магістерській роботі проведений геостатистичний аналіз природи та структури просторових даних цифрових моделей рельєфу. Проведена інтерполяція методом крігінга. Створена карта рельєфу дна Придунайської водойми Ялпуг-Кугурлуй, розташованої в Одеській області. Побудовано її 3D моделі.

Об'єкт дослідження – цифрові моделі рельєфу.

Предмет дослідження – геостатистичний аналіз структури просторових даних цифрових моделей рельєфу.

Мета роботи полягає у побудові цифрової моделі рельєфу дна водно-озерного об'єкту з використанням ГІС-технологій.

Методи дослідження – традиційні методи математичного моделювання, геостатистичні методи, новітні геоінформаційні і картографічні методи дослідження, методи інтерполяції.

Структура магістерської роботи складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань на 18 найменувань, додатків. Повний обсяг роботи становить 75 сторінок, містить 39 рисунків і 2 таблиці.

Ключові слова: геоінформаційна система, цифрова модель рельєфу, геостатистичний аналіз, TIN, GRID.

ABSTRACT

Master's degree diploma work is devoted the geostatistical analysis of the nature and structure of spatial data digital elevation models. Kriging interpolation was done. Map of the bottom relief of the Yalpug – Kuhurluy lakes, which located in Odessa region. Its 3D model was constructed.

The object of study is the digital elevation model.

Subject of research is the geostatistical analysis of the geodata structure of digital elevation models.

The aim of the work is the geostatistical study of digital elevation models which based on the different interpolation methods.

Research methods are the traditional methods of mathematical modeling, geostatistical methods, the latest GIS and mapping methods, interpolation methods.

Keywords: geographic information system, digital elevation models, geostatistical analysis, TIN, GRID.

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	7
Вступ	8
1 Дослідження існуючих способів цифрового зображення рельєфу.....	10
1.1 GRID-модель	11
1.2 TIN - модель	14
1.3 Порівняльний аналіз GRID і TIN моделей.....	16
2 Дослідження моделей Аналізу просторово розподілених даних	20
2.1 Аналіз детерміністичних методів	20
2.2 Крос-валідація	25
2.3 Метод інтерполяції крігінг	28
3 Опис модуля Geostatistical Analyst	32
3.1 Геостатистична модель	32
3.2 Інструменти дослідного аналізу просторових даних	36
3.3 Майстер операцій геостатистики Geostatistical Wizard	41
4 Геостатистичний аналіз просторових даних ЦМР на основі методів інтерполяції	49
4.1 Вибір методу побудови ЦМР дна водосховища	49
4.2 Метод інтерполяції Торо to Raster.....	60
4.3 Створення 3D моделі рельєфу дна водосховища в пакеті ArcScene	63
Висновки.....	68
Перелік джерел посилання	70
Додаток А Карти батиметричної зйомки	73
Додаток Б Цифрові моделі рельєфу дна водойм	75

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БГД	– база геоданіх
ВММ	– віртуальна модель місцевості
ГІС	– географічна інформаційна система
ДДЗ	– дані дистанційного зондування
ЗЗВ	– метод зворотно зважених відстаней
ПБГД	– персональна база геоданих
ПЗ	– програмне забезпечення
СКБД	– система керування базами даних
ЦМР	– цифрова модель рельєфу
DEM	– Digital Elevation Model (цифрова модель рельєфу)
ESDA	– Spatial Data Analysis
ESRI	– Environmental Systems Research Institute
GRASS	– Geographic Resources Analysis Support System
GRS-80	– Geodetic Reference System, 1980
gvSIG	– Generalitat Valenciana, Sistema d'Informació Geogràfica
ILWIS	– Integrated Land and Water Information System
IDW	– Inverse Distance Weighted
NASA	– National Aeronautics and Space Administration
OGC	– Open Geospatial Consortium
OSGeo	– Open Source Geospatial Foundation
SAGA	– System for Automated Geoscientific Analyses
SDTS	– Spatial Data Transfer Standard
SRTM	– Shuttle Radar Topography Mission
TIN	– Triangulated Irregular Network
uDig	– User-friendly Desktop Internet GIS
UTM	– Universal Transverse Mercator
VAT	– Value Attribute Table
WGS-84	– World Geodetic System, 1984

ВСТУП

Велика кількість геоінформаційних задач пов'язані з обробкою нерівномірно розподілених у просторі даних. Особливо, це стосується географічних інформаційних систем, так як в цих системах можна зробити виміри тільки в деяких точках. Рішенням таких завдань є застосування різних методів інтерполяції. Інтерполяція – спосіб знаходження проміжних значень величини за наявним дискретним набором відомих значень.

Актуальність роботи обумовлена потребою географічних досліджень у використанні даних про рельєф в цифровій формі у зв'язку зі зростаючою роллю геоінформаційних технологій (ГІС) при вирішенні різних просторових завдань, необхідністю підвищення якості та ефективності методів створення і використання цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

При побудові цифрових моделей рельєфу відомі значення координат тільки в певних точках. Цей фактор значно погіршує точність побудови рельєфу. Для вирішення відповідних просторових задач застосовують різні геостатистичні методи.

Зазвичай первинні дані про рельєф з використанням тих чи інших операцій приводяться до одного з двох найбільш широко поширених видів поверхонь (полів) в ГІС: растровому поданню (моделі GRID) і моделі TIN.

Стосовно до ЦМР растрове подання поверхні позначає матрицю висот – регулярну мережу висотних відміток в її вузлах, відстань між якими (крок) визначає її просторову роздільну здатність. Модель TIN – це мережа трикутників – елементів триангуляції Делоне – з висотними відмітками в її вузлах, що дозволяє уявити поверхню, що моделюється, як багатогранну.

Для порівняння наявних цифрових моделей рельєфу однієї і тієї ж місцевості і оцінки точності моделювання необхідно провести геостатистичні дослідження просторових даних цифрових моделей рельєфу на основі різних методів інтерполяції.

Метою данної магістерської роботи є побудова цифрової моделі рельєфу (ЦМР) дна водно-озерного об'єкту з використанням ГІС-технологій.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- провести дослідження моделей та форматів для представлення просторової інформації;
- провести порівняльний аналіз різних методів інтерполяції для моделювання ЦМР;
- провести огляд сучасного програмного забезпечення для геостатистичного аналізу і моделювання ЦМР;
- провести геостатистичне дослідження структури просторових даних цифрових моделей рельєфу на прикладі побудови моделі рельєфу дна водно-озерного об'єкту.

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ

Рельєф земної поверхні відіграє найважливішу роль при вирішенні широкого кола географічних завдань. Широке впровадження ГІС і геоінформаційних технологій в географічні дослідження передбачає використання даних про рельєфи в цифровій формі – у вигляді цифрових моделей рельєфу (ЦМР).

Цифрова модель рельєфу – це засіб цифрового представлення тривимірних просторових об'єктів (поверхонь, рельєфів) у вигляді сукупності висотних відміток (відміток глибин) і інших значень аплікату (координат Z) в вузлах регулярної мережі, нерегулярної трикутної мережі або як сукупність записів горизонталей (ізогипс, изобат) або інших ізоліній [1]¹⁾.

У роботі [2]²⁾ дано таке визначення цифрової моделі рельєфу: "Під ЦМР будь-якого поля будемо розуміти певну форму представлення вихідних даних і спосіб їх структурного опису, що дозволяє обчислювати (відновлювати) значення поля в заданій області шляхом інтерполяції". Мова в цьому визначенні йде про будь-які так звані "географічні поля", як реальні, так і абстрактні, "для яких незалежними змінними є просторові координати, а в якості залежних змінних виступають досліджувані кількісні показники". Рельєф земної поверхні є окремим випадком такого географічного поля, де залежною змінною виступає висота (чи глибина).

Для аналізу на основі чисельних методів найбільш зручні дві форми подання: у вигляді значень у вузлах регулярної сітки (сіткові моделі) і у вигляді значень у вузлах нерегулярної трикутної мережі (триангуляційні моделі). Ізолінейну форму подання використовувати безпосередньо для візуалі-

¹⁾ [1] Василюха, І. Ю. Особливості цифрового моделювання складних типів рельєфу // Геодезія, картографія та аерофотознімання. 2007. випуск 68. С. 269 – 279.

²⁾ [2] Мусин О.Р., Сербенюк С.Н. Цифровые модели "рельефа" континуальных и дискретных географических полей // Банки географических данных для тематического картографирования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. С.156 – 170.

зації (за винятком способу ізоліній, причому тільки з уже наявним кроком перетинів) і аналізу дуже складно. Область визначення в перших двох випадках розбивається на безліч прямокутних або трикутних осередків, що дозволяє легко відновлювати значення висот в довільній точці шляхом інтерполяції, а також знаходити похідні показники і виконувати чисельний аналіз.

Найбільш простим способом інтерполяції для трикутних комірок є лінійна функція двох змінних $f(x,y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y$, коефіцієнти якої однозначно визначаються за значеннями висот в вершинах трикутника. Для прямокутних комірок аналогічною властивістю володіє білінійна функція $f(x,y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy$. Для рідкісних сіток з великими відстанями між вузлами для відновлення значень показника іноді вживають і більш складні функції для побудови яких використовуються значення в сусідніх комірках [3, 4]¹⁾. Однак найчастіше такі способи використовуються для згущення сітки з подальшим використанням простіших способів. Кожна із зазначених вище форм має свої достоїнства і недоліки, проте триангуляційні моделі застосовуються в основному для великих масштабів, оскільки дозволяють вбудовувати в свою структуру кордони природних і штучних об'єктів, тоді як сіткові, незважаючи на деяку надмірність даних порівняно з триангуляційними моделями, для будь-яких.

1.1 GRID-модель

GRID модель (грід, регулярна мережа) представляє собою спосіб організації геоданих в базі даних ГІС у вигляді безлічі рівних за розмірами і територіально пов'язаних комірок, упорядкованих у вигляді рядків і стовпців, ко-

¹⁾ [3] Agishtein M.E., Migdal A.A. Smooth surface reconstruction from scattered data points // Computer & Graphics, 1991, vol.15, No.1, pp.29-39

[4] Akima H. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points // ACM Trans. Math. Software, 4,2 (June, 1978), pp.148-159.

жна з яких відображає якісні та кількісні характеристики реальних геооб'єктів (або їх класів), а також процесів або явищ [5]¹⁾.

Грид-модель складається з комірок. Кожна клітинка – це прямокутник, який представляє певну частину земної поверхні (аналогічно пікселю растрової моделі). В рамках окремої грид-моделі всі її осередки мають однаковий розмір. Вони організовані у вигляді рядків і стовпців (рис. 1.1).

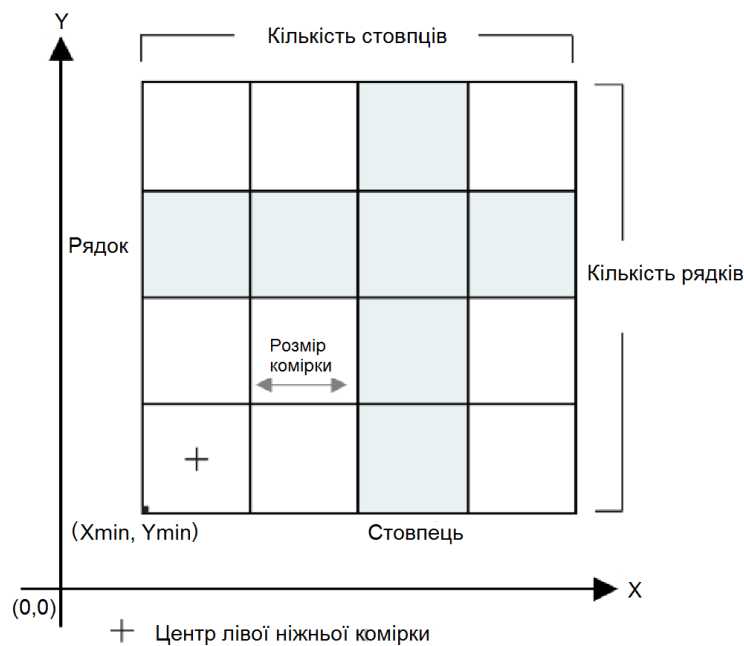


Рисунок 1.1 – Структура грид-моделі

Кожній комірці грид-моделі присвоюється певне значення, що служить для ідентифікації або опису класу, категорії, групи геооб'єктів, до яких вона відноситься, або для завдання кількісного показника якості процесу або явища. Значення комірки може представляти такі характеристики, як температура повітря, опади, ландшафти і т.д.

Гриди, на відміну від растрів, є геореляційними моделями, тобто вони здійснюють зв'язок просторових і атрибутивних даних, що є базисом для ГІС-аналізу та моделювання. Атрибути гріда зберігаються в атрибутивній

¹⁾ [5] Хромых, В. В. Цифровые модели рельефа: Учебное пособие / В. В. Хромых, О. В. Хромых. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 164 с.

таблиці значень (VAT). Таблиця атрибутів ґрида містить в собі два поля: VALUE (значення – призначене для зберігання значень комірок) і COUNT (кількість – зберігає кількість комірок, що мають однакові значення). Одна запис в таблиці VAT відноситься до всіх осередків з однаковим значенням, в той час як один запис в атрибутивній таблиці вектора відноситься до конкретного геооб'єкту (рис. 1.2).

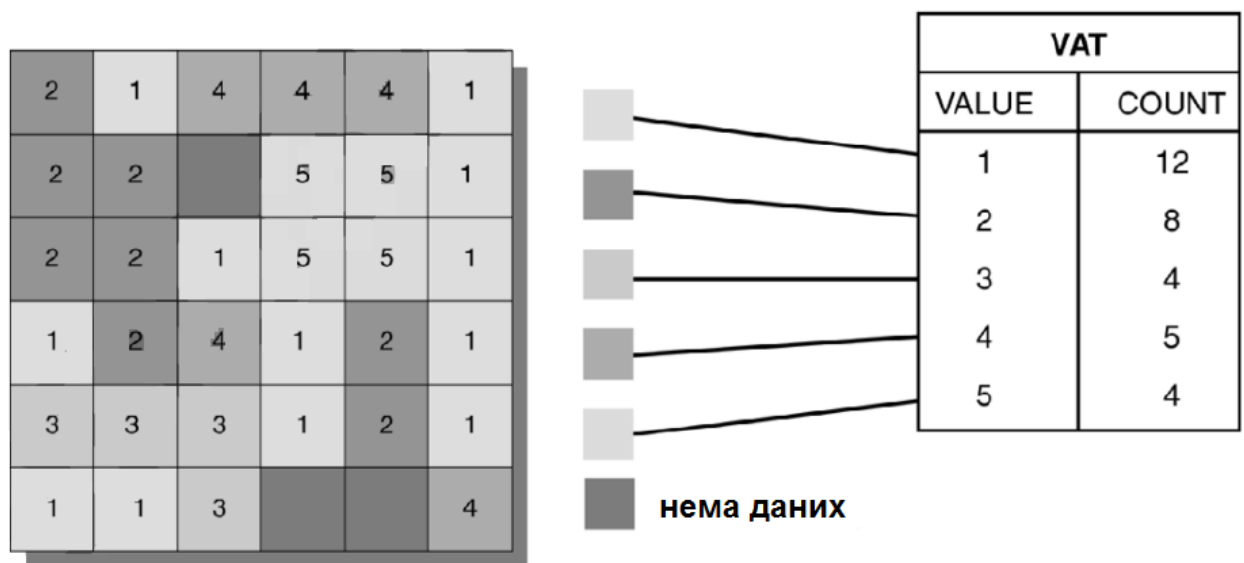


Рисунок 1.2 – Ґрид-модель та її атрибути

Якщо комірки присвоєно значення «немає даних», це означає, що даних про задану характеристику в точці, яку представляє комірка, або немає, або недостатньо.

Кожній ґрид-моделі властива реальна (географічна або проєкційна) система координат. Вона визначається розміром комірки ґрида, кількістю його рядків і стовпців і координатами X, Y центру верхньої нижньої комірки. Процес перетворення ґрида з одної картографічної проєкції в іншу називається геометричною трансформацією.

Серед основних функцій ГІС-аналізу та моделювання на основі комірок ґрида в ГІС можна відзначити: створення ґрида шляхом інтерполяції, виконання аналізу поверхонь, картування відстаней, картування щільності та ін.

1.2 TIN - модель

TIN (triangulated irregular network – триангуляційна нерегулярна мережа) – структура організації географічних даних, що описує тривимірну земну поверхню у вигляді пов'язаних між собою загальними вершинами і сторонами трикутників, що не перетинаються, неправильної форми. Кожна вершина трикутника в даній мережі визначається трьома координатами (x, y, z) його вершин (рис. 1.3).

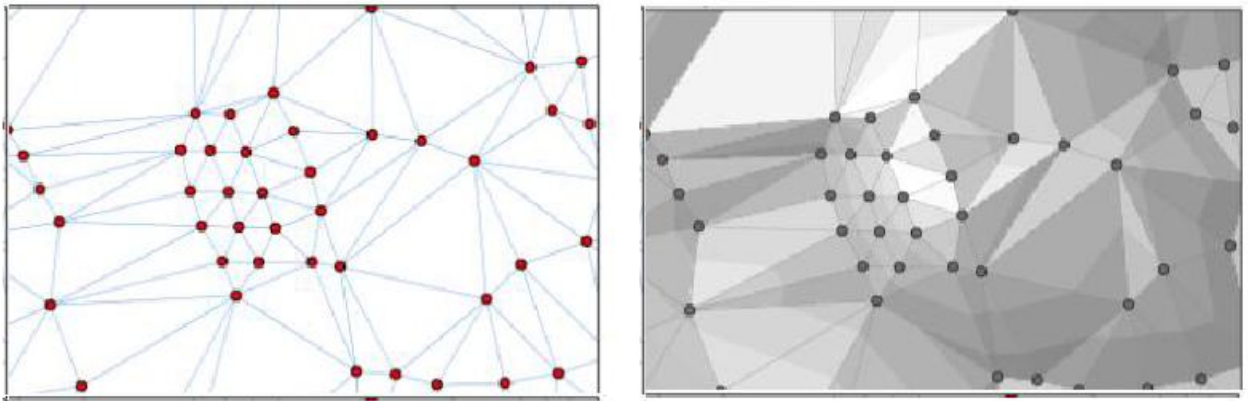


Рисунок 1.3 – TIN модель

TIN-модель є специфічною векторною топологічною моделлю даних і виступає як альтернатива ґрид-моделі при поданні безперервних поверхонь. TIN представляє поверхню як набір пов'язаних трикутників, що відображено в її назві «триангуляційна». Трикутники будуються з трьох точок, що належать до довільних областей поверхні, що і підкреслюється прикметником «нерегулярна». Нарешті, модель TIN створює мережу трикутників, зберігаючи топологічні відносини між ними [5,6]¹⁾.

¹⁾ [5] Хромых, В. В. Цифровые модели рельефа: Учебное пособие / В. В. Хромых, О. В. Хромых. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 164 с.

[6] Журкин И.Г., Шайтура С.В. Геоинформационные системы. М.:КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. 272 с.

Геометрія моделі TIN утворюється гранями і вузлами трикутників в тривимірному просторі. Грань – це сторона трикутника в тривимірному просторі, а вузол – його вершина з координатами X, Y, Z (рис. 1.4).

Існують два основних способи зберігання TIN: по трикутниках і по точках. При кодуванні мережі по трикутниках для кожного з них в базі даних створюється запис, що містить його унікальний номер, координати трьох його вершин, а також номери трьох сусідніх з ним трикутників.



Рисунок 1.4 – Елементи трикутника TIN-моделі

При зберіганні по точках (вузлах) для кожного вузла моделі зберігаються її унікальний номер, координати і список вузлів, з якими вона з'єднана прямими (за годинниковою стрілкою).

Модель TIN має такі властивості:

- дозволяє отримати точне уявлення про тривимірну земну поверхню;
- є базисом 3D-візуалізації природних, природно антропогенних і антропогенних геооб'єктів в ГІС;
- дозволяє виконувати аналіз 3D-поверхонь (обчислення відміток в будь-якій точці геопространства, ухилів, експозицій схилів, отримання ізольованих поверхні з заданим перетином, розрахунок об'ємів, створення гіпсометричних профілів, аналіз видимості).

Джерелами даних для побудови моделі TIN є [6]¹⁾:

¹⁾ [6] Журкин И.Г., Шайтура С.В. Геоинформационные системы. М.:КУДИЦ-ПРЕСС, 2009. 272 с.

- мас-точки – векторний точковий шар, що використовується як вершина трикутників моделі TIN;
- лінії перегину є лініями з висотою (координатою Z), зареєстрованої в кожній вершині. У TIN-моделі вони стають послідовностями одного або більше країв трикутника моделі, що перетинаються ними. Зазвичай лінії перегину представляють собою природні (хребти або водотоки) або штучні об'єкти (наприклад, шосе);
- полігони, що вирізають, використовуються для визначення меж поверхні TIN. Вони необхідні, коли область даних має неправильну форму;
- полігони, що стирають, визначають отвори в TIN. Вони використовуються, щоб представити області, для яких немає даних;
- полігони, які заміщають, визначають області постійної висоти. Вони використовуються, щоб представити водні тіла (якщо немає даних про їх батиметрію) або штучні об'єкти, які є плоскими.

Для кожного з перерахованих джерел побудови TIN-моделей можуть бути застосовані жорсткі і м'які специфікатори, щоб вказати, чи відбувається помітний перегин в ухилі поверхні ності чи ні.

1.3 Порівняльний аналіз GRID і TIN моделей

Оскільки і модель GRID, і модель TIN набули широкого розповсюдження в географічних інформаційних системах і підтримуються багатьма видами програмного забезпечення ГІС, то необхідно знати достоїнства і недоліки кожної моделі, щоб правильно вибрати формат зберігання даних про рельєф.

До переваг моделі GRID слід віднести простоту і швидкість її комп'ютерної обробки, що пов'язано з самою растровою природою моделі. Пристрої виведення, такі як монітори, принтери, плотери та ін., дають змогу

отримувати зображення використовуючи набори крапок, тобто також мають растровий формат. Тому зображення GRID легко і швидко виводяться на такі пристрої, так як на комп'ютерах легко виконати розрахунок для подання окремих квадратів регулярної мережі висот з допомогою точок або відеопікселів пристроїв виведення.

Завдяки своїй растровій структурі модель GRID дозволяє «згладити» модельовану поверхню і уникнути різких граней і виступів. Але в цьому криється і «мінус» моделі, тому що при моделюванні рельєфу гірських районів (особливо молодих – наприклад, альпійської складчастості) з великою кількістю крутих схилів і гострих вершин можлива втрата і «розмивання» структурних ліній рельєфу та спотворення загальної картини. У подібних випадках потрібне збільшення просторового дозволу моделі (кроку сітки висот), а це загрожує різким зростанням обсягу комп'ютерної пам'яті, необхідної для зберігання ЦМР. Як правило, моделі GRID займають більше місця на диску, ніж моделі TIN. Щоб прискорити відображення великих за обсягом цифрових моделей рельєфу застосовуються різні методи, з яких найбільш популярний – побудова так званих пірамідальних шарів, що дозволяють при різних масштабах використовувати різні рівні детальності зображення. Подібний підхід, зокрема, реалізований в програмному комплексі ArcGIS (ESRI Inc.).

Таким чином, модель GRID ідеально підходить для відображення географічних (геологічних) об'єктів або явищ, характеристики яких плавно змінюються в просторі (рельєф рівнинних територій, температура повітря, атмосферний тиск, пластовий тиск нафти та ін.).

Таким чином, можна відзначити наступні загальні переваги подання ЦМР за допомогою GRID моделей [5]¹⁾:

- представляє ЦМР без необхідності її додаткової обробки;
- придатний для аналізу поверхонь;

¹⁾ [5] Хромых, В. В. Цифровые модели рельефа: Учебное пособие / В. В. Хромых, О. В. Хромых. Томск : ТМЛ–Пресс, 2007. 164 с.

- простий у зберіганні і маніпулюванні;
- легко об'єднується з растровими даними;
- при візуалізації здатний наочно демонструвати особливості рельєфу.

До недоліків використання «ґріда» можна віднести наступні:

- практично неможливо виділити екстремальні глибини;
- нездатність використовувати різні розмірності у єдиному «ґріді» для відображення ділянок поверхні з різною розчленованістю рельєфу;
- неефективність зберігання інформації (надмірна кількість вузлових точок у районах низькою розчленованістю рельєфу).

Як було зазначено вище, недоліки моделі GRID проявляються при моделюванні рельєфу молодого горотворення. Особливо неблагополучна ситуація з використанням регулярної мережі висотних відміток складається, якщо на території, що моделюється, чергуються великі вирівняні ділянки з ділянками уступів і обривів, є різкі перепади висот, як, наприклад, в широких розроблених долинах великих рівнинних річок. В такому випадку на більшій території буде «надмірність» інформації, тому що вузли сітки GRID на плоских ділянках матимуть одні й ті ж висотні значення. Але на ділянках крутих уступів рельєфу розмір кроку сітки висот може виявитися занадто великим, а, відповідно, просторова роздільна здатність моделі – недостатньою для передачі «пластики» рельєфу.

Подібних недоліків позбавлена модель TIN. Оскільки використовується нерегулярна мережа трикутників, то плоскі ділянки моделюються невеликим числом величезних трикутників, а на ділянках крутих уступів, там, де необхідно детально показати всі грані рельєфу, поверхня відображається численними маленькими трикутниками. Це дозволяє більш ефективно використовувати ресурси оперативної і постійної пам'яті комп'ютера для зберігання моделі.

До числа «мінусів» TIN слід віднести великі витрати комп'ютерних ресурсів на обробку моделі, що істотно сповільнює відображення ЦМР на екрані монітора і виведення на друк, тому що при цьому потрібно

растеризація. Одним з рішень цієї проблеми може бути введення «гібридних» моделей, що поєднують структурні лінії TIN і спосіб відображення у вигляді регулярного набору точок. Як приклад подібних моделей можна вказати формат ArcGIS.

Ще один істотний недолік моделі TIN – «ефект терас», виражається в появі так званих «псевдотрикутників» – плоских ділянок у свідомо неможливій геоморфологічній ситуації (наприклад, по лінії днища V-образних долин). Одна з основних причин – малість відстаней між точками цифрового запису горизонталей в порівнянні з відстанями між самими горизонталями, що характерно для більшості типів рельєфу в їх картографічних відображеннях [7]¹⁾. «Псевдотрикутники» виникають там, де всі три вершини трикутника лежать на одній горизонталі. Поява таких морфологічних артефактів порушує морфографію і морфометрію модельованого рельєфу і знижує точність і якість самої моделі і її похідних. Один із способів значного поліпшення якості і морфологічної правдоподібності ЦМР складається в розширенні моделі TIN шляхом її структурування – введення в неї мережі тальвегів, вододілів і ліній перегинів і розривів (бровок, уступів терас і т.п.).

¹⁾ [7] Кошкарев А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика. М.: Геодезиздат, 1993. 213 с.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ АНАЛІЗУ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИХ ДАНИХ

Існуючі на даний момент підходи до аналізу і обробки просторово розподілених даних можна розділити на 4 групи [8]¹⁾:

- детерміністичні моделі: триангуляція, метод зворотних зважених відстаней, поліноміальні методи, сплайн-інтерполяція;
- геостатистики – моделі, засновані на статистичній інтерпретації даних;
- алгоритми штучного інтелекту (нейромережеві методи);
- моделі, засновані на статистичній теорії навчання (теорія Валніка - Червоненкіса): машини векторів підтримки.

В рамках даної магістерської роботи будуть розглянуті детерміністичні і геостатистичні моделі.

2.1 Аналіз детерміністичних методів

Процес розрахунку, або передбачення значень Z -параметра між точками вимірювання називається інтерполяцією.

При використанні детерміністичних методів передбачається, що аналізовані дані описуються деякою детерміністичною функцією. Завдання полягає в тому, щоб на базі відомих значень параметрів в точках і на іншій контекстній інформації про досліджувальне явище побудувати деяку функцію $z(x)$ для всієї досліджуваної області.

Після знаходження функції значення характеристики в будь-якій точці можна бути обчислити за формулою.

¹⁾ [8] Каневский М. Ф., Демьянов В. В. Введение в методы анализа данных по окружающей среде / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского М.: ВИНТИ, 1999. с. 2 - 12.

Один з найпростіших методів просторової інтерполяції – метод найближчого сусіда [9]¹⁾. При використанні даного підходу для будь-якої точки досліджуваної області в якості значення функції приймається значення найближчій по евклидової відстані точки. В результаті інтерполяції вся область дослідження розбивається на ділянки з відомими значеннями – полігони Вороного (Тіссена), або комірки Дирихле (рис. 2.1). Побудована таким чином функція є розривною.

При застосуванні методу лінійної інтерполяції з використанням трикутників (модель TIN) поверхня, що отримується, є безперечною. Вся досліджувана область розбивається на трикутники, і шукана функція представляється як сукупність площин, які визначаються заданими значеннями в вершинах трикутників (рис. 2.2).

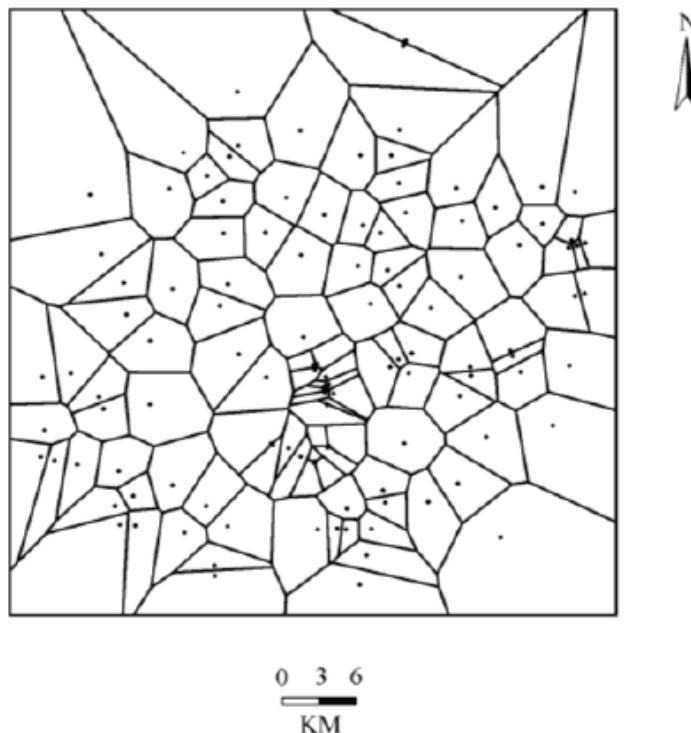


Рисунок 2.1 – Полігони Вороного (Тіссена)

¹⁾ [9] Савельева Е. А., Демьянов В. В., Чернов С. Ю. Детерминистические методы пространственной интерполяции / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского, М.: ВИНТИ, 1999. с. 13-25.

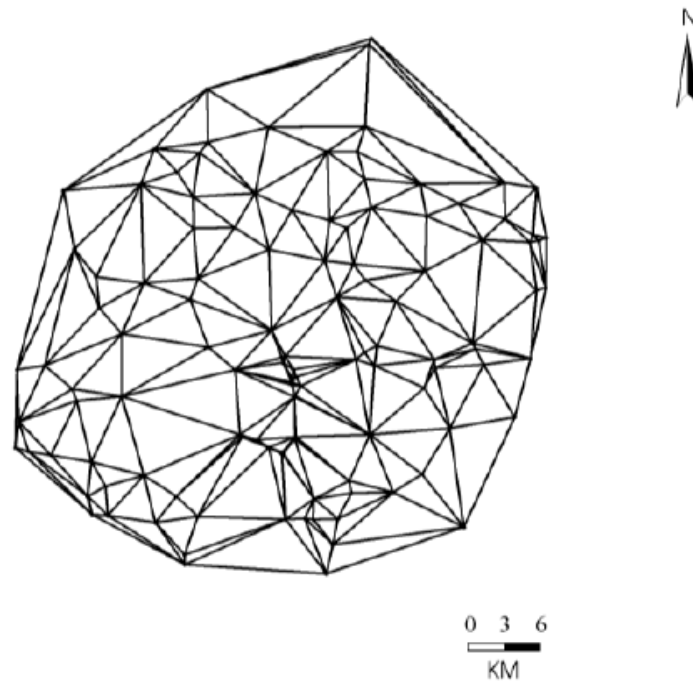


Рисунок 2.2 – Поверхня, що отримана методом інтерполяції Делоне

На практиці найбільш часто доводиться працювати з поверхнями, у яких зміни висотних відміток в просторі підпорядковуються більш складному закону. Найбільш часто використовуються два детерміністичних методів: метод зворотних зважених відстаней – ЗЗВ (в англ. транскрипції IDW – зворотне зважена відстань) і метод поверхні тренда.

В основі методу зворотних зважених відстаней лежить припущення, що, чим ближче один до одного розташовані точки в просторі, тим менше розходження між значеннями параметра в них. Значення Z -параметра в кожній точці розраховується за формулою:

$$Z'(x, y) = \sum_{i=1}^N W_i(x, y) Z(x_i, y_i), \quad (2.1)$$

де $W_i(x, y)$ – нормовані ваги, які можуть обчислюватися за різними формулами.

Наприклад, в основі середньозваженої інтерполяції за методом Гаусса лежить рівняння виду:

$$W_i(x, y) = 1/R_i^k, \quad (2.2)$$

де k – ступінь ваговій функції, а R_i – відстань від оцінюваної точки до i -ї точки вихідного набору [10]¹⁾. У формулі для розрахунку вагових коефіцієнтів Крессмана введений радіус пошуку:

$$W_i(x, y) = (D_i^2 - R_i^2)/(D_i^2 + R_i^2), \quad (2.3)$$

де D_i – радіус впливу i -ї точки.

Радіус впливу може бути як постійною, так і змінною величиною, яка залежить від щільності точок. Коефіцієнти Крессмана, як правило, нормалізують так, щоб сума всіх $W_i(x)$ дорівнювала одиниці [9]²⁾.

При використанні методу ЗЗВ ближчі точки вносять більший внесок в визначення інтерпольованої характеристики в порівнянні з віддаленими точками. Характеристики поверхні, що розраховується, залежать від обмеження на кількість вхідних точок і наявності заданих користувачем бар'єрів. В якості бар'єрів можуть виступати природні або штучні непереборні об'єкти (берегова лінія, скелі).

На рис. 2.3 зображена поверхня, отримана на основі узагальнених показників стану деревостанів методом IDW.

¹⁾ [10] Жуков В. Т., Новаковский Б. А., Чумаченко А. Н. Компьютерное геоэкологическое картографирование. М.: Научный мир, 1999. 128 с.

²⁾ [9] Савельева Е. А., Демьянов В. В., Чернов С. Ю. Детерминистические методы пространственной интерполяции / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского, М.: ВИНТИ, 1999. с. 13-25.

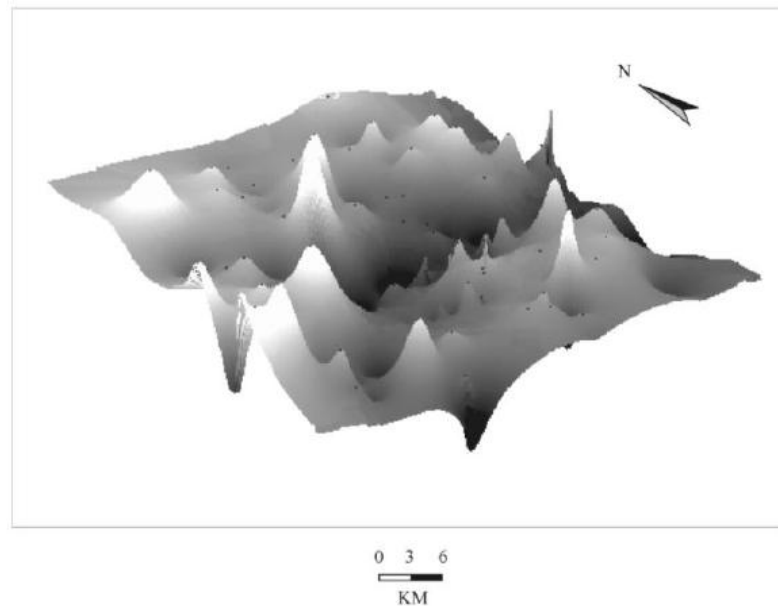


Рисунок 2.3 – Поверхня, що побудована за методом IDW

Метод поверхні тренда дозволяє оцінити загальні тенденції зміни параметрів поверхні. При розрахунку аплікати, як і в методі IDW, використовується набір точок в межах певної заданої околиці. У межах кожної околиці будується поверхня найкращого наближення. В якості математичних рівнянь використовуються поліноми. У випадку з поліноміальними інтерполятором значення, що розраховується в точці, представляють у вигляді полінома від координат [9]¹⁾:

$$Z'(x, y) = P_n(x, y),$$

де P_n – поліном n -го ступеня.

Зазвичай на практиці використовують поліном другого ступеня:

$$P_2(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2. \quad (2.4)$$

¹⁾ [9] Савельєва Е. А., Демьянов В. В., Чернов С. Ю. Детерминистические методы пространственной интерполяции / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского, М.: ВИНТИ, 1999. с. 13-25.

Форма поверхні при поліноміальній інтерполяції залежить від ступеня полінома. При цьому поверхня не проходить через задані точки, а розташована так, щоб сума найменших квадратів між розрахунковими і істинними значеннями була найменшою. На рис. 2.4 зображено поверхню, що отримана на основі використання полінома 2-го ступеня.

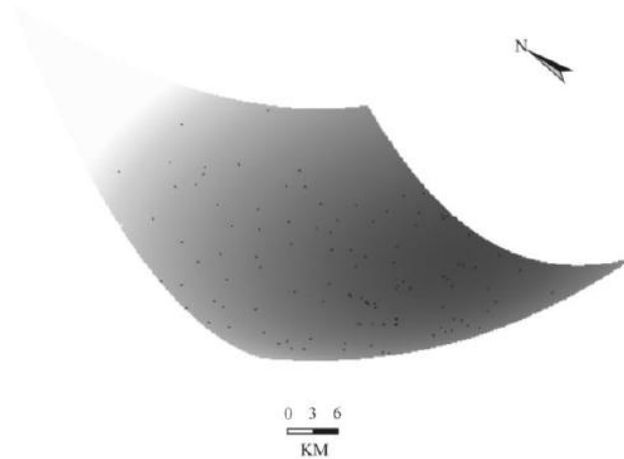


Рисунок 2.4 – Поверхня, отримана у результаті інтерполяції з використанням полінома другого ступеня

Підвищення ступеня полінома ускладнює форму поверхні. У результаті застосування сплайн-інтерполяції виходить гладка поверхня, що проходить через вихідні точки (рис. 2.5).

2.2 Крос-валідація

Поверхні, отримані на основі одних і тих же даних різними методами інтерполяції, відрізняються за своїми характеристиками. Для порівняння методів, оцінки очікуваних помилок і ступеня відповідності прогнозу реальним

даним використовують процедуру, що зветься крос-валідація [9]¹⁾. Крос-валідацію проводять тільки для заданого набору точок, тому що значення оцінюваної функції відомі тільки для них.

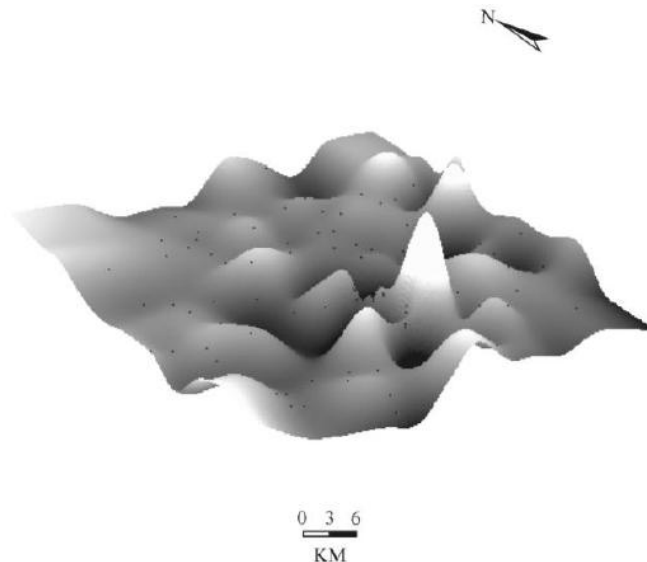


Рисунок 2.5 – Поверхня, отримана у результаті використання сплайн-інтерполяції

З бази даних тимчасово вилючається одна точка і проводиться оцінка величини Z в даній точці з використанням всіх точок, що лишилися. Розраховане значення порівнюється з відомим. Потім процедура повторюється для кожної точки з бази даних. Нижче наведені формули розрахунку відхилення (нев'язки) і відносної помилки:

$$d = Z(x_i, y_i) - Z'(x_i, y_i), \quad (2.5)$$

$$error(x_i, y_i) = 100 \cdot (Z(x_i, y_i) - Z'(x_i, y_i)) / Z(x_i, y_i), \quad (2.6)$$

¹⁾ [9] Савельева Е. А., Демьянов В. В., Чернов С. Ю. Детерминистические методы пространственной интерполяции / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского, М.: ВИНТИ, 1999. с. 13-25

де $Z'(x_i, y_i)$ і $Z(x_i, y_i)$ – розрахункові і відоме значення інтерпольованого параметру в точці (x_i, y_i) .

На основі отриманих значень нев'язок і відносних помилок можна проводити порівняння різних методів інтерполяції, а при нанесенні їх на карту можливо порівняння областей по найкращому оцінюванню.

За результатами крос-валідації також можна обчислювати глобальні характеристики методу [9]¹⁾.

Для розрахунку зсуву середнього значення використовується формула

$$\Delta_m = m - m', \quad (2.7)$$

де m – середнє значення, розраховане за вихідними даними;

m' – середнє значення, розраховане за результатами оцінювання.

Сума квадратів нев'язок розраховується за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^N (Z(x_i, y_i) - Z'(x_i, y_i))^2 + R. \quad (2.8)$$

У разі, якщо при деяких вхідних параметрах величину $Z'(x_i, y_i)$ отримати неможливо, наприклад, при дуже малому радіусі пошуку, то S привласнюють деяке значення R .

Розрахунок середньоквадратичної помилки (root mean square error – RMSE) виконують за формулою:

$$RMSE = \sqrt{1/N \cdot \sum_{i=1}^N (Z(x_i, y_i) - Z'(x_i, y_i))^2}. \quad (2.9)$$

Коефіцієнт ефективності розраховується за такою формулою:

¹⁾ [9] Савельєва Е. А., Демьянов В. В., Чернов С. Ю. Детерминистические методы пространственной интерполяции / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского, М.: ВИНТИ, 1999. с. 13-25

$$E = S/S_0. \quad (2.10)$$

Тут

$$S_0 = \sum (Z(x_i, y_i) - m)^2. \quad (2.11)$$

Оцінка якості моделі може виконуватися на основі незалежних репрезентативних даних, що не використовувалися в процесі побудови моделі. Для цього перед початком інтерполяції всі вихідні дані розбиваються на навчальну і тестову вибірки. При побудові моделі використовують навчальну вибірку, а для оцінки моделі в формули (2.5) – (2.11) в якості $Z(x_i, y_i)$ підставляють значення з тестової вибірки.

2.3 Метод інтерполяції крігінг

Метод інтерполяції – крігінг оптимізує процедуру інтерполяції на основі статистичної природи поверхні. Крігінг знайшов широке застосування в різних областях людської діяльності: в геології, ґрунтознавстві, екології [11–14]¹⁾.

В основі цього методу лежить теорія регіоналізованої змінної (regionalized variable theory). Передбачається, що значення змінної змінюється в просторі безперервно, але не може моделюватися тільки одним математичним рівнянням. Зміна значень параметра залежить від трьох незалежних

¹⁾ [11] Mcbratney A. B., Webster R. Choosing function for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates // J. Soil Science. 1986. № 37. P. 617-639.

[12] Ковин Р.В, Марков Н.Г. Геоинформационные системы: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 175 с.

[13] Скворцов А.В. Геоинформатика: Учебное пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 336 с.

[14] Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 128 с.

компонент. Перша називається дрейф (drift), або структура (structure) поверхні, і представляє загальний тренд в певному напрямку. Другий компонент називається випадковою, просторово-корельованою компонентою (random, spatially correlated component) і описує випадкові, незначні, але просторово пов'язані один з одним відхилення від загальної тенденції. Третя компонента називається випадковим шумом (random noise) і викликає відхилення, що не пов'язані із загальною тенденцією і не мають просторової автокореляції.

У крігінге формула для розрахунку величини аплікати в деякій точці аналогічна формулі (2.1):

$$Z(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i, y_i), \quad (2.12)$$

де $Z(x_0, y_0)$ – значення Z , розраховане для будь-якої точки x_0 ;

λ_i – ваговий коефіцієнт, пов'язаний зі значенням характеристики в точці x_i ;

$Z(x_i, y_i)$ – значення характеристики в точці.

Вагові коефіцієнти $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ знаходяться в результаті варіограмного аналізу (variogram, semivariogram analysis). Варіограммой називають залежність полудисперсії, або семіваріанси (semivariance), від відстані між точками, де проводилися вимірювання. Цю відстань прийнято називати лагом (lag). Величину семіваріанси розраховують за формулою:

$$\gamma(h) = 1/2n(h) \cdot \sum_{i=1}^n [Z(x_i, y_i) - Z((x_i, y_i) + h)]^2, \quad (2.13)$$

де $\gamma(h)$ – семіваріанса для відстані h ;

$Z(x_i, y_i)$ – значення характеристики в точці (x_i, y_i) ;

$Z((x_i, y_i) + h)$ – значення характеристики в точці, що знаходиться на відстані h від (x_i, y_i) ;

$2n(h)$ – кількість пар значень, розділених відстанню h .

Сума всіх вагових коефіцієнтів λ_i дорівнює одиниці.

Якщо існує просторова кореляція між величинами досліджуваного параметра, то зі збільшенням відстані між точками вимірювання значення семіваріанс зростають до певної межі (рис. 2.6). При подальшому збільшенні лага величини $\gamma(h)$ залишаються приблизно на одному рівні. Цей рівень прийнято називати силл (sill). Величину h , при якій значення $\gamma(h)$ досягає свого максимуму, прийнято називати рангом (a). Ранг показує максимальну відстань між точками, при якому ще існує просторова кореляція між значеннями параметра.

Для апроксимації семіваріограмм використовуються різні математичні функції.

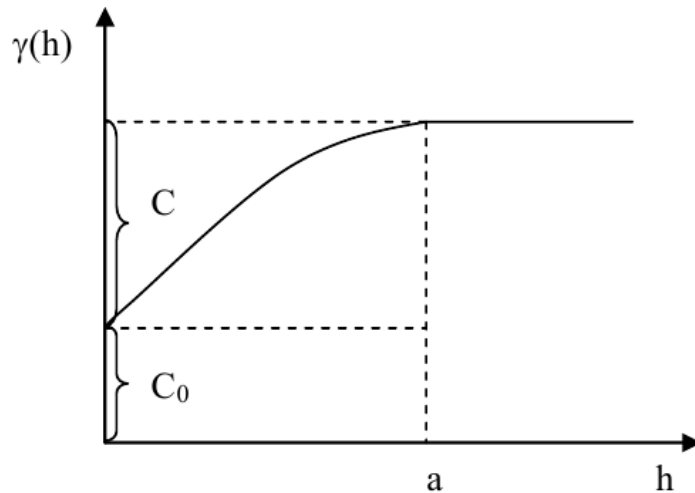


Рисунок 2.6 – Параметри полуваріограмми для сферичної моделі

Формула для сферичної моделі має вигляд:

$$\gamma(h) = C_0 + C\{3h/2a - (h/a)^3\} \text{ для } 0 < h \leq a, \quad (2.14)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \text{ для } h > a, \quad (2.15)$$

де C_0 – шумова варіанса;

C – структурна варіанса;

a – ранг;

$C_0 + C$ – силл.

Формула для експоненційної моделі має вигляд:

$$\gamma(h) = C_0 + C\{1 - \exp(-h/r)\} \text{ для } h > 0, \quad (2.16)$$

де r – параметр, що визначає просторову шкалу варіації показника, аналогічно рангу в попередній формулі.

У експоненційної моделі функція наближається до силл асимптотично і відповідно не має чіткого рангу. Тому вводять ефективний ранг $a' = 3r$, при якому $\gamma(h) = C_0 + 0.95 C$.

На рис. 2.7 зображена поверхня, отримана в результаті інтерполяції – крігінг.

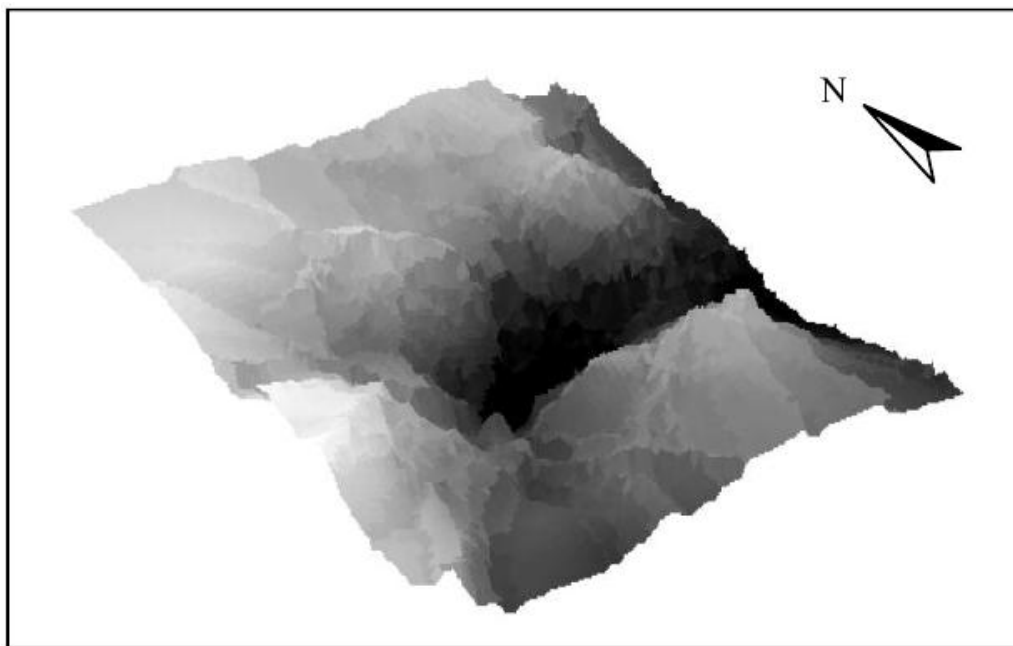


Рисунок 2.7 – Поверхня, отримана в результаті використання методу інтерполяції – крігінг

3 ОПИС МОДУЛЯ GEOSTATISTICAL ANALYST

Модуль Geostatistical Analyst призначений для удосконалення моделювання поверхні з використанням детерміністичних і геостатистичних методів. Geostatistical Analyst розширює можливості ArcMap за рахунок появи додаткових інструментів, призначених для дослідницького аналізу просторових даних, а також Майстра операцій геостатистики, який допомагає в процесі побудови статистично достовірної поверхні. Поверхні, що створюються за допомогою модуля Geostatistical Analyst, можуть бути згодом використані в моделях ГІС і для візуалізації з використанням таких розширень, як ArcGIS Spatial Analyst і 3D Analyst [15]¹⁾.

Модуль геостатистичного аналізу використовує значення в опорних точках, розташованих в різних частинах ландшафту, і будує (інтерполює) безперервну поверхню. Опорні точки – це точки, в яких виміряні значення будь-якого явища, наприклад, розміри витоку радіації з атомної електростанції, або обсяги протоки нафти, або значення висот. Побудови поверхні з використанням модуля Geostatistical Analyst включає три ключові етапи [16]²⁾: дослідницький аналіз просторових даних; структурний аналіз (обчислення і моделювання властивостей поверхні в сусідніх точках); інтерполяція поверхні і оцінка результатів.

3.1 Геостатистична модель

На рис. 3.1 наведена геостатистична модель для виконання геостатистичного аналізу.

Перший крок, як і майже в будь-якому дослідженні, – це ретельне вивчення даних. Цей процес починається з картографування набору даних з ви-

¹⁾ [15] Сайт справочної системи ArcGIS. URL: webhelp.esri.com/arcgisdesktop (дата звернення 15.11.2019)

²⁾ [16] ArcGIS Resources URL: <http://resources.arcgis.com/en/home/> (дата звернення 15.11.2019)

користанням класифікації і колірної схеми, що дозволяють ясно відобразити важливі характеристики, які може містити набір даних, наприклад, сильне зростання значень з півночі на південь; поєднання високих і низьких значень поза певного порядку (це може означати, що дані були відібрані в масштабі, що не відображає просторову кореляцію); або більш щільно відібрані зони (преференційна вибірка), що може привести до вирішення використовувати ваги декластеризації в аналізі даних.



Рисунок 3.1 – Геостатистична модель

Друга стадія – це побудова геостатистичної моделі. Цей процес може включати кілька кроків в залежності від цілей вивчення (тобто типи інформації, яку імовірно надає модель) і від характеристик набору даних, які вва-

жалися досить важливими для включення. На цій стадії інформація, зібрана під час ретельного дослідження набору даних, і первинні знання про явище, визначають рівень складності моделі і ступінь точності інтерпольованих значень і заходів невизначеності.

На рис 3.1 модель може включати попередню обробку даних для видалення просторових трендів, які моделюються окремо і додаються назад на фінальному етапі процесу інтерполяції; перетворення даних для більшої відповідності гауссовому розподілу (потрібно для декількох методів і вихідних даних моделі); і декластеризацію набору даних для компенсації преференційної вибірки. Тоді як велику кількість інформації можна отримати, ретельно досліджуючи набір даних, тим не менш важливо включити будь-які відомості, які є про це явище. Розробник не може покладатися тільки на набір даних, щоб показати всі важливі характеристики. Ті характеристики, що не відображаються, все ще можуть бути включені в модель шляхом настройки значень параметрів для відображення очікуваного результату. Дуже важливо, щоб модель була реалістичною, наскільки це можливо, для точного уявлення інтерпольованих значень і пов'язаних з ними невизначеностей як характеристики реального явища.

Крім попередньої обробки даних, в наборі даних може бути необхідно змодельовати просторову структуру (просторову кореляцію). Деякі методи, наприклад, крігінг, вимагають ретельного моделювання з використанням функцій варіограми або коваріації, тоді як інші методи, такі як метод зворотних зважених відстаней, спираються тільки на передбачувану ступінь просторової структури, інформацію про яку проектувальник повинен надати на основі попередніх даних про явище.

Підсумковим компонентом моделі є пошук стратегії. Стратегія визначає, як багато точок даних буде використовуватися для обчислення значення для неопорної розташування. Також можна задати їх просторову конфігурацію (положення відносно один одного і неопорного розташування). Обидва чинники впливають на інтерпольоване значення і пов'язану з ним невизначе-

ність. Для багатьох методів задається еліпс пошуку поряд з кількістю секторів еліпса і кількістю точок, взятих з кожного сектора для побудови прогнозу.

Після того як модель буде повністю задана, вона буде використана разом з набором даних для створення інтерпольованих значень для всіх неопорних розташувань, що знаходяться в області інтересу. Підсумком зазвичай є створення карти, яка б показала значення модельованої змінної. Підсумок значень, що випадають, може бути досліджений на цій стадії, оскільки ці значення, можливо, змінять значення параметра моделі, і таким чином зміниться інтерполяція карти. Залежно від методу інтерполяції, також можна використовувати схожу модель для обчислення заходів невизначеності інтерпольованих значень. Не всі моделі мають цю можливість, тому важливо спочатку задати, чи необхідні вимірювання невизначеності. Це в свою чергу визначить, яка з моделей є підходящою.

Оскільки використовуються всі типи моделювання, результат моделювання необхідно перевірити, тобто переконатися, що інтерпольовані значення і пов'язані з ними заходи невизначеності є значущими і відповідають очікуванням.

Після побудови відповідної моделі, її налаштування і перевірки результату, отримані результати можуть бути використані в аналізі ризиків і прийняття рішень.

Інструменти, що надаються модулем ArcGIS Geostatistical Analyst групуються в три категорії:

- панель інструментів Geostatistical Analyst надає доступ до серії діаграм Spatial Data Analysis (ESDA);
- майстер операцій геостатистики (також доступний через панель інструментів) дозволяє аналітикам створювати і оцінювати модель інтерполяції;

- набір інструментів геообработки, які спеціально призначені для роботи з вихідними даними моделей і розширюють можливості Майстра операцій геостатистики.

До графіків ESDA і майстра Geostatistical Wizard можна отримати доступ через панель інструментів ArcGIS Geostatistical Analyst Extension, яка повинна додаватися до відображення ArcMap після того, як був активований додатковий модуль ArcGIS Geostatistical Analyst Extension.

3.2 Інструменти дослідного аналізу просторових даних

Перш ніж використовувати методи інтерполяції, необхідно вивчити дані за допомогою інструментів дослідного аналізу просторових даних. Дані інструменти дозволяють розібратися в даних і вибрати найбільш підходящий метод і параметри для моделі інтерполяції. Наприклад, при використанні ординарного крігінга для побудови карти квантилів необхідно вивчити розподіл вхідних даних, оскільки цей конкретний метод передбачає, що дані підкоряються закону нормального розподілу. У разі коли дані не підкоряються нормальному розподілу, в модель інтерполяції необхідно включити перетворення даних. Також за допомогою інструментів ESDA можуть бути виявлені просторові тренди в даних, і необхідно буде включити етап для незалежного моделювання тренда як частину процесу інтерполяції.

Отримати доступ до інструментів ESDA можна через панель інструментів ArcGIS Geostatistical Analyst Extension, яка показана на рис.3.1. До складу інструментів входять:

- Histogram – досліджує розподіл і сумарну статистику набору даних.
- Normal QQ Plot and General QQ Plot – перевіряють нормальний розподіл набору даних і досліджують можливість наявності однакового розподілу в двох наборах даних відповідно.
- Voronoi Maps – візуально досліджує просторову варіабельність і стаціонарність набору даних.

- Trend Analysis – візуалізує і досліджує просторові тренди в наборі даних.
- Semivariogram / Covariance Cloud – оцінює просторову залежність (варіограму і ковариацію) в наборі даних.
- Crosscovariance Cloud – перевіряє просторову залежність (взаємну ковариацію) між двома наборами даних.

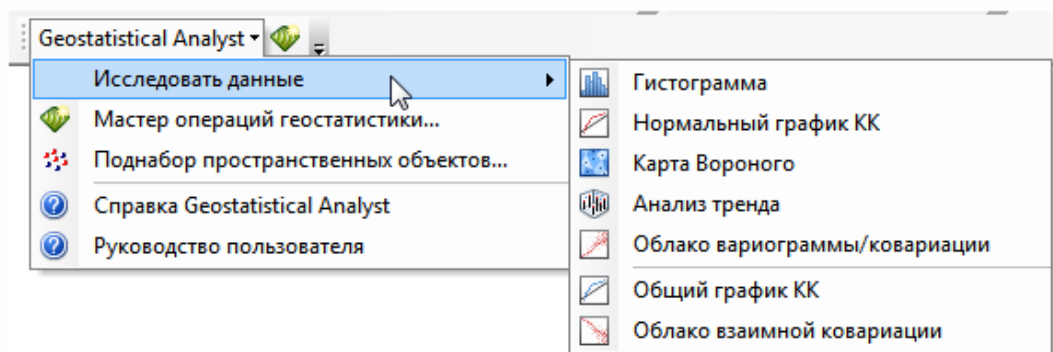


Рисунок 3.1 – Панель інструментів Geostatistical Analyst Extension

Графіки ESDA представлені на рис.3.2 і рис.3.3. На графіках рис.3.2 представлені інструменти ESDA, які одночасно використовуються для аналізу одного набору даних. На рис.3.3 представлені два інструменти, призначені для дослідження відносин між двома наборами даних.

Нижче розглянемо терміни та концепції, які зустрічаються в геостатистичі і в модулі Geostatistical Analyst.

Перехресна перевірка. Метод для оцінки точності інтерполяційної моделі. У Geostatistical Analyst перехресна перевірка пропускає одну точку і використовує інші точки для інтерполяції значення в цьому положенні. Потім ця точка повертається в набір даних, а інші видаляються. Це робиться для всіх опорних точок в наборі даних, і в результаті надається пара очікуваних і відомих значень, які можуть використовуватися для оцінки якості моделі. Результати, як правило, виводяться з середніми і середньквдратическими помилками.

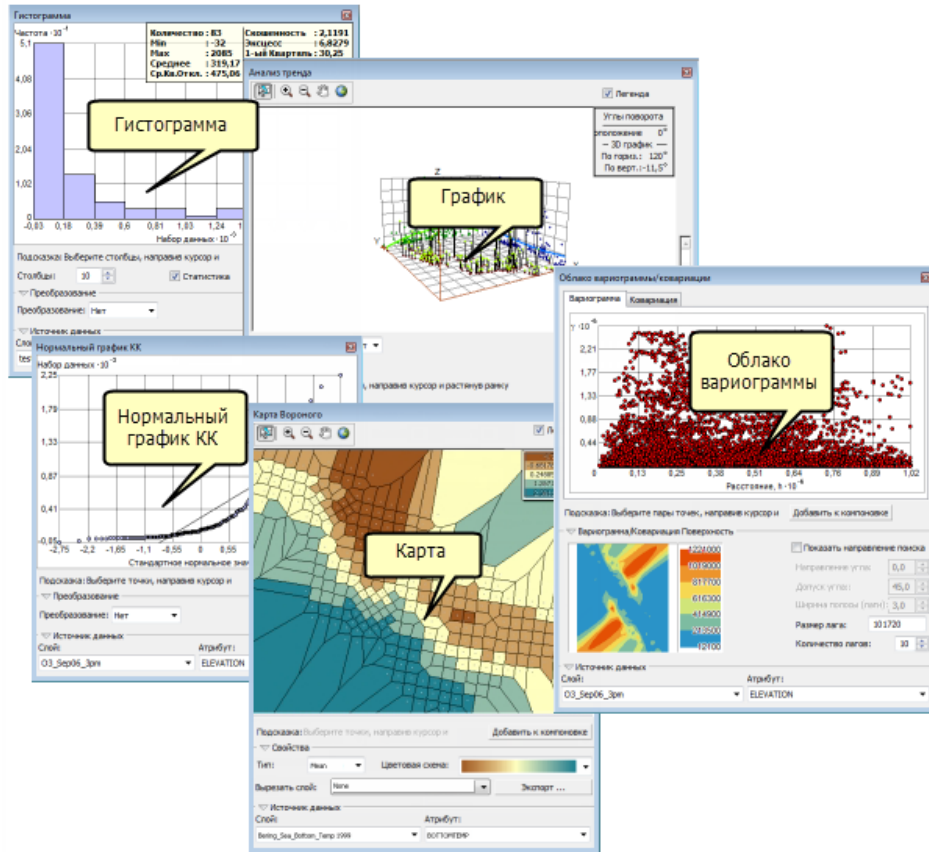


Рисунок 3.2 – Приклади одновимірних інструментів ESDA

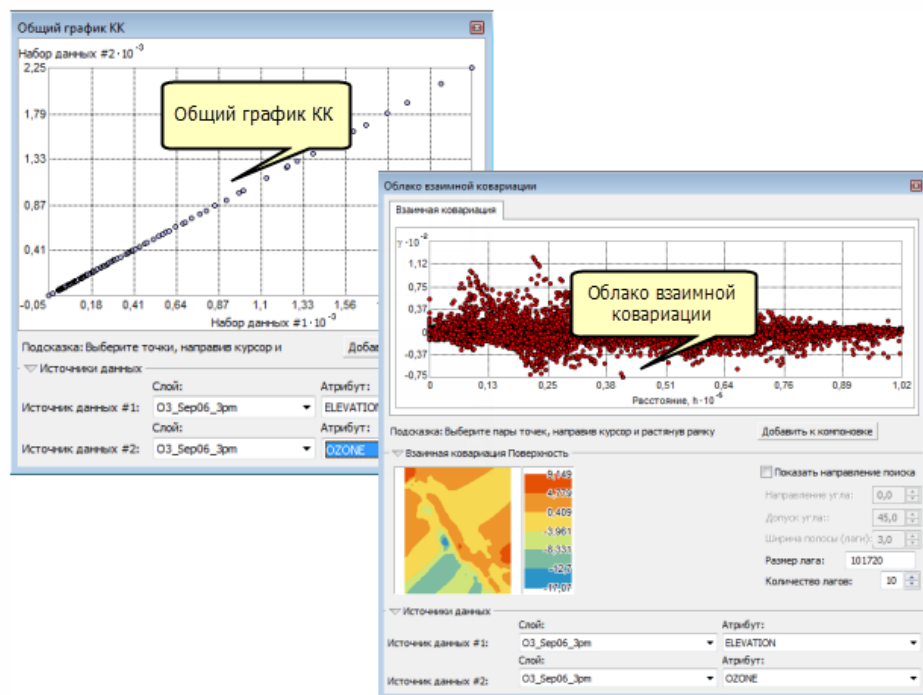


Рисунок 3.3 – Приклади двовимірних інструментів ESDA

Детерміновані методи. У Geostatistical Analyst детерміновані методи – це методи, які створюють поверхні по вимірним точкам на підставі ступеня спільності (наприклад, метод зворотних зважених відстаней) або ступеня згладжування поверхні (наприклад, радіальні базисні функції). Вони не надають міру невизначеності (помилки) інтерполяції.

Геостатистичний шар. Результати роботи Майстра операцій геостатистики і безлічі інструментів геообработки в наборі інструментів Geostatistical Analyst зберігаються у вигляді поверхні, яка називається геостатистичним шаром. Геостатистичні шари використовуються для створення карт результатів, перегляду і виправлення значень параметрів методу інтерполяції (при відкритті їх в Майстрі операцій геостатистики), створення інших типів геостатистичних шарів (наприклад, карт помилок інтерполяції) і експорту результатів в растровий або векторний (ізолінії, контуру з заливкою і точки) формат.

Геостатистичні методи. У Geostatistical Analyst геостатистичні методи – це методи, засновані на статистичних моделях, які включають автокореляції (статистичні відносини між вимірюваними точками). Такі методи мають можливість створювати поверхні інтерполяції, а також вимірювати невизначеність (помилки), пов'язані з інтерполяцією.

Інтерполяція. Процес, який використовує вимірні значення в відомих опорних точках для прогнозування (оцінки) значення для тих точок, де вимірювання не проводилися. Geostatistical Analyst надає кілька методів інтерполяції, які розрізняються базовими припущеннями, вимогами до даних і можливістю створювати різні типи вихідних даних (наприклад, карти проінтерполірованих значень, а також карти помилок (невизначеності), пов'язаних з інтерполяцією).

Ядро. Вагова функція, яка використовується декількома методами інтерполяції в Geostatistical Analyst. Зазвичай, більш високі ваги присвоюються значенням опорних точок, що знаходяться поблизу інтерпольованого місця розташування, а менші ваги – значенням опорних точок, розташованих на більшій відстані.

Крігінг. Набір методів інтерполяції, які спираються при виконанні інтерполяції на моделі варіограмми просторової автокореляції, що враховують помилки, пов'язані з інтерполяцією і іншу інформацію, що стосується розподілу можливих значень для кожного місця розташування в досліджуваній області (за допомогою карт квантилів і карт ймовірностей або за допомогою геостатистичного моделювання, який надає набір можливих значень для кожного місця розташування).

Околиця пошуку. Більшість методів інтерполяції використовує локальний набір даних для виконання інтерполяції. Уявіть ковзне вікно: для виконання інтерполяції в центрі вікна використовуються тільки дані у вікні. Це робиться тому, що є надлишкова інформація в опорних точках, віддалених від положення, де необхідно виконати інтерполяцію і зменшити розрахунковий час, необхідний для створення проінтерполірованих значень для всієї досліджуваної області. Вибір околиці (кількість найближчих опорних точок і їх просторова конфігурація в вікні) вплине на інтерпольовану поверхню, тому вибір потрібно здійснювати обережно.

Варіограма. Функція, що описує відмінності (дисперсію) між опорними точками, віддаленими на різну відстань. Зазвичай, варіограма показує низьку дисперсію для малих відмінностей і велику дисперсію для більшої відстані поділу, вказуючи на те, що дані просторово автокорреліровані. Варіограмми, які оцінені за опорним даними, є емпіричними варіограммами. Вони представляються як набір точок на графіку. Функція підібрана до цих точок і називається моделлю варіограмми. Модель варіограмми є головним компонентом в крігінгі.

Імітація. У геостатистики імітацією називається метод, який розширює можливості крігінга за допомогою створення безлічі можливих версій інтерпольованої поверхні (крігінг ж створює тільки одну поверхню). Набір інтерпольованих поверхонь надає можливість використовувати відомості, які можуть застосовуватися для опису невизначеності інтерпольованого значення для конкретного положення, невизначеності для набору інтерпольованих

значень в області інтересу або набору інтерпольованих значень, які можуть використовуватися в якості вхідних даних для другої моделі (фізичні, економічні тощо) для оцінки ризиків і прийняття більш обґрунтованих рішень.

Просторова автокореляція. Природне явище часто є просторовою автокореляцією: значення близьких один до одного опорних точок більш схожі, ніж значення точок, що знаходяться далеко один від одного. Деяким методам інтерполяції необхідна явна модель просторової автокореляції (наприклад, крігінг), інші засновані на передбачуванні ступеня просторової автокореляції без надання засобів вимірювання (наприклад, метод зворотних зважених відстаней), а іншим не потрібно ніяких уявлень про просторову автокореляцію в наборі даних. При наявності просторової автокореляції, традиційні статистичні методи, засновані на автономності спостережень, можуть бути неблагонадійними.

Перетворення. Перетворення даних виконується із застосуванням функції (логарифмічною, Вох-Сох, арксинуса, нормальних міток) до даних для зміни форми їх розподілу та / або стабілізації дисперсії (зменшення відносин між середнім і дисперсією, наприклад, так щоб мінливість даних збільшувалася по мірі збільшення середнього значення).

Перевірка. Перевірка подібна перехресній перевірці, але замість використання того ж набору даних для побудови та оцінки моделі, використовується два набори даних: один для побудови моделі, інший – для незалежного тестування її якості. Якщо доступний тільки один набір даних, то інструмент піднабору просторових об'єктів може використовуватися для довільного розбиття піднаборів на навчальний і тестовий.

3.3 Майстер операцій геостатистики Geostatistical Wizard

До майстра Geostatistical Wizard можна отримати доступ за допомогою панелі інструментів ArcGIS Geostatistical Analyst Extension, як показано на рис.3.4.

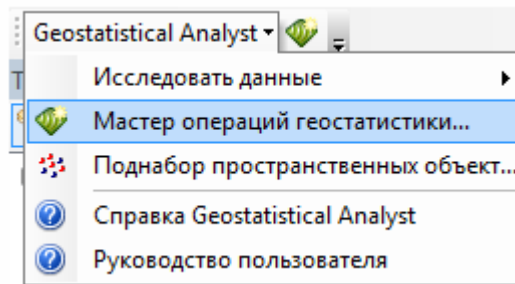


Рисунок 3.4 – Вікно запуску майстра Geostatistical Wizard

Geostatistical Wizard – це динамічний набір сторінок, які розроблені з метою провести користувача через процес побудови моделі інтерполяції і оцінки її якості. Вибір, зроблений на сторінці, визначає доступні параметри на наступних сторінках і способи взаємодії з даними для побудови відповідної моделі. Майстер веде від точки вибору методу інтерполяції до перегляду підсумкової статистики, що дозволяє оцінити очікувану якість моделі. Спрощена версія такого робочого процесу (для методу зворотних зважених відстаней) представлена на рис.3.5.

Під час побудови моделі інтерполяції майстер дозволяє вносити зміни в значення параметрів, пропонує оптимальні значення і дозволяє рухатися вперед або повертатися назад для оцінки результатів перехресної перевірки, щоб визначити чи задовольняє поточна модель вимогам або необхідно змінити значення параметрів. Така гнучкість, в доповненні до перегляду динамічних даних і поверхонь, робить майстер повнофункціональним середовищем для побудови моделей інтерполяції.

Майстер Geostatistical Wizard надає доступ до кількох методів інтерполяції, які поділяються на два основних типи: детерміновані і геостатистичні.

Детерміновані методи мають параметри, що управляють ступенем схожості значень (наприклад, метод зворотних зважених відстаней або ступенем згладжування поверхні (наприклад, радіальні базисні функції). Такі методи не ґрунтуються на моделі випадкового просторового процесу. Також відсутні

явні вимірювання або просторова автокорреляція даних. До детермінованих методів відносяться:

- Інтерполяція за методом глобального полінома;
- Інтерполяція за методом локального полінома (Local Polynomial Interpolation);
- Метод зворотних зважених відстаней (Inverse Distance Weighted);
- Радіальні базисні функції (Radial Basis Functions);
- Інтерполяція з бар'єрами (використовує в процесі інтерполяції про-никні або напівпроникні бар'єри).

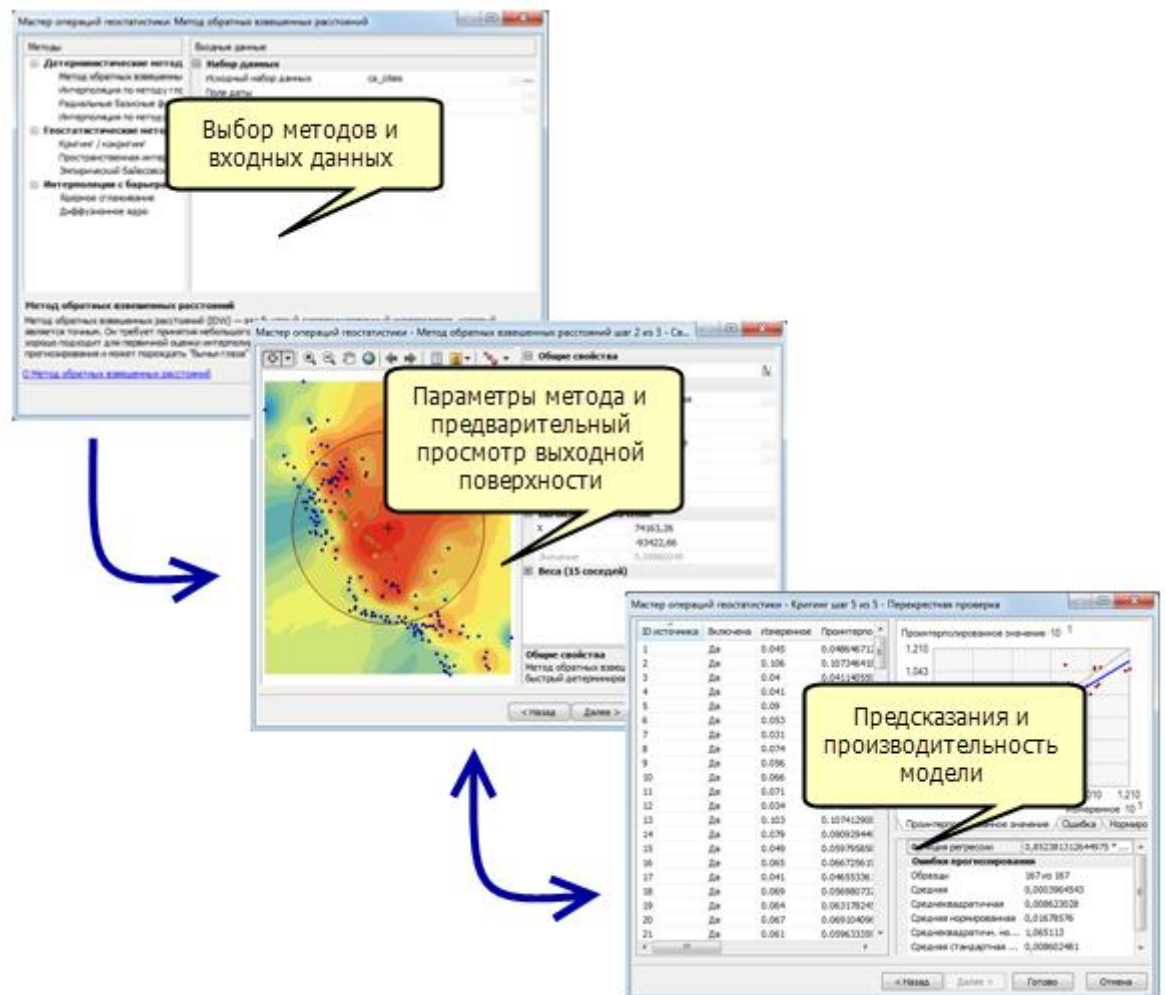


Рисунок 3.5 – Спрощений робочий процес в Geostatistical Wizard

Геостатистичні методи припускають, що певна просторова варіація, характерна для природних явищ, може бути змодельована за допомогою випадкових процесів з просторовою автокореляцією; геостатистичні методи вимагають, щоб просторова автокореляція була явно змодельована. Геостатистичні методи можуть використовуватися для опису і моделювання просторових патернів (варіографія), прогнозування значень в точках, де вимірювання не виконувалися (крігінг), і оцінки невизначеності, пов'язаної з інтерпольованими значеннями в таких точках (крігінг).

Майстер Geostatistical Wizard пропонує кілька видів крігінга, які підходять для різних типів даних і мають різні базові припущення:

- ординарний (Ordinary);
- простий;
- універсальний (Universal);
- індикаторний (Indicator);
- імовірнісний (Probability);
- диз'юнктивний (Disjunctive);
- майданна інтерполяція (Areal interpolation);
- емпіричний байесовський.

Дані методи використовуються для побудови наступних поверхонь:

- карти проінтерполірованих значень крігінга;
- карти стандартних помилок крігінга, пов'язаних з проінтерполірованими значеннями;
- карти ймовірностей, які вказують, перевищено конкретний критичний рівень;
- карти квантилів для визначеного рівня ймовірності.

Існують винятки. Індикаторний і імовірнісний крігінгі створюють:

- карти ймовірностей, які вказують, перевищено конкретний критичний рівень;
- карти стандартних помилок індикаторів.

Майданна інтерполяція створює:

- карти прогнозованих значень;
- карти стандартних помилок, пов'язаних з проінтерполіованими значеннями.

3.4 Набір інструментів Geostatistical Analyst

Набір інструментів ArcGIS Geostatistical Analyst Extension включає в себе інструменти для аналізу даних, побудови різних вихідних поверхонь, дослідження і перетворення геостатистичних шарів в інші формати, виконання геостатистичного імітації та аналізу чутливості, а також сприяння в розробці мереж опорних точок. Інструменти поділяються на п'ять груп (рис.3.6) [16]¹⁾:

- Interpolation – містить інструменти геообработки, які виконують інтерполяцію (як і майстер Geostatistical Wizard) і можуть використовуватися як автономні інструменти або у вікнах ModelBuilder і Python;
- Sampling Network Design – містить інструменти, що сприяють у проектуванні або зміні існуючих мереж опорних точок / моніторингових мереж;
- Simulation – доповнює можливості крігінга, виконуючи геостатистичне моделювання, і дозволяє вилучення змодельованих результатів для точок або для полігональних ділянок;
- Utilities – містить інструменти загального призначення для вилучення піднаборів даних; для виконання перехресної перевірки для оцінки якості моделі; для перевірки чутливості до зміни параметрів варіограми і для візуального представлення околиць, які використовуються інструментами інтерполяції

¹⁾ [16] ArcGIS Resources URL: <http://resources.arcgis.com/en/home/> (дата звернення 15.11.2019)

- Working with Geostatistical Layers – інструменти, що генерують проінтерполіровані значення для точкових місцезнаходжень. Експортують геостатистичні шари в растровий і векторний формати, вибирають і встановлюють параметри моделі інтерполяції в XML-файлі параметрів і створюють нові геостатистичні шари на основі XML-файла параметрів і наборів даних.

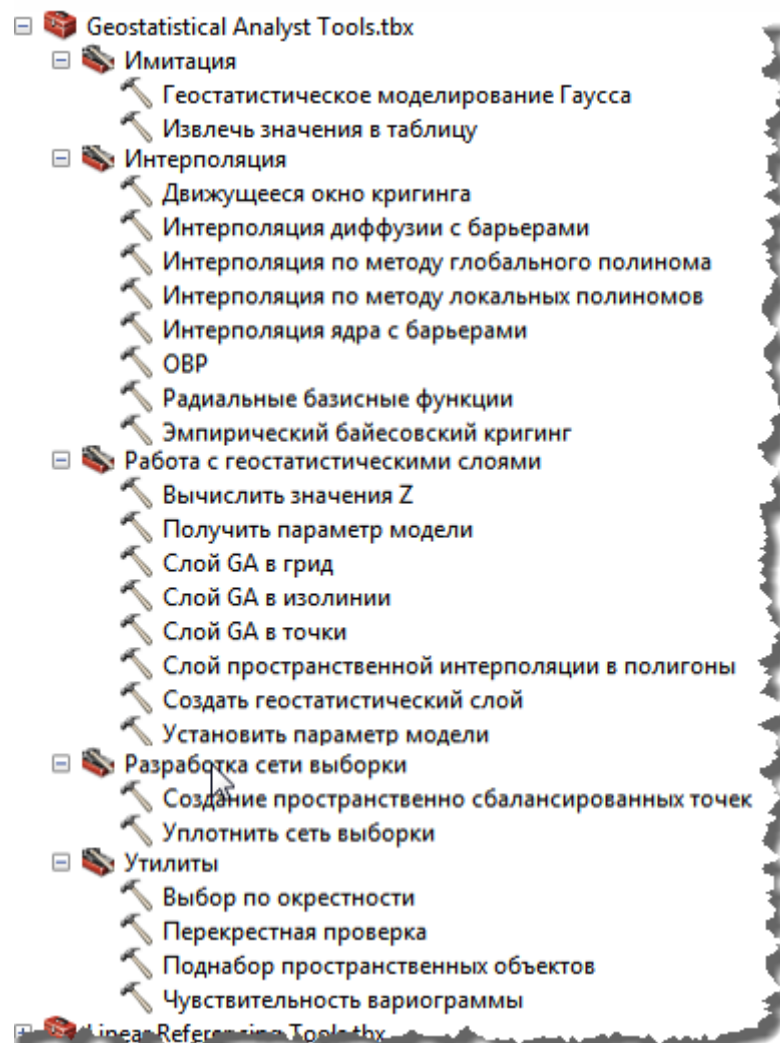


Рисунок 3.6 – Перелік інструментів ArcGIS Geostatistical Analyst Extension

Незважаючи на те що перехресна перевірка виконується для всіх методів в майстрі Geostatistical Wizard і може бути також виконана для будь-якого геостатистичного шару за допомогою інструменту геообработки Перехресне

перевірка (Cross Validation), більш суворим підходом до оцінки якості вихідної поверхні є порівняння проінтерполірованих значень з вимірами, які не використовувалися для побудови моделі інтерполяції. Так як не завжди випадає нагода повернутися на досліджувану територію для збору незалежного набору даних для перевірки, рішення полягає в тому, щоб розділити вихідний набір даних на дві частини. Одна частина може використовуватися для побудови моделі і створення поверхні. Інша частина – для порівняння та перевірки вихідної поверхні. Інструмент піднабору просторових об'єктів (Subset Features) дозволяє розділити набір даних на навчальний і тестовий набори. Для зручності інструмент піднабору просторових об'єктів є на панелі інструментів ArcGIS Geostatistical Analyst Extension, як показано на рис.3.7.

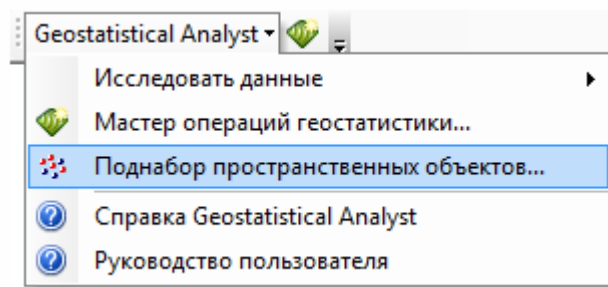


Рисунок 3.7 – Вікно інструменту піднабору просторових об'єктів

ArcGIS Geostatistical Analyst Extension включає в себе безліч інструментів для аналізу даних і створення різних вихідних поверхонь. Хоча причини виконання дослідження можуть змінитися, рекомендується використовувати наступний підхід при аналізі і картографуванні просторових процесів:

- подання даних (Represent the data) – створює шари і відображає їх в ArcMap;
- дослідження даних (Explore the data) – досліджує статистичні та просторові властивості наборів даних;

– вибір відповідного методу інтерполяції (Choose an appropriate interpolation method) – при виборі необхідно керуватися завданнями вивчення, розумінням явища і метою моделювання (вихідними даними);

– підбір моделі (Fit the model) – для створення поверхні. Майстер Geostatistical Wizard використовується для визначення та деталізації відповідної моделі;

– виконання діагностики (Perform diagnostics) – перевіряє обґрунтованість результатів і оцінює вихідну поверхню за допомогою перехресної перевірки і перевірки. Це допоможе зрозуміти те, як модель прогнозує значення у неопорних положеннях.

4 ГЕОСТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ЦМР НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

4.1 Вибір методу побудови ЦМР дна водосховища

Основою для вирішення завдань, пов'язаних з процесом спрацювання водоймища і визначенням потужності донних відкладень, може служити застосування цифрової моделі рельєфу (ЦМР) дна водойми. Створимо ЦМР дна Придунайської водойми Ялпуг-Кугурлуй. Для коректної побудови цифрових моделей рельєфу будемо використовувати інтерполяційні методи, реалізовані в модулях Geostatistical Analyst і Spatial Analyst ГІС ArcGIS 10.2.

Поставимо задачу побудови оптимальної ЦМР дна водного об'єкта, розглянувши в якості вихідних даних результати батиметричної зйомки глибин водосховища Ялпуг-Кугурлуй (додаток А).

Експедиційні роботи проводилися в період з 12 по 30 серпня 2001 року фахівцями Одеського національного університету, Дунайської гідрометобсерваторії. При цьому використовувалися: мотокатер «Вихор» Дунайської ГМО і моторний човен типу «Дніпро». Батиметрія проводилася методом ехолотування за проектними профілями приладом LOWRANCE – LCX-15 з одноканальним випромінювачем для прісної води. З моторного човна вимірювання проводилися ехолотом LOWRANCE – X-24. Випромінювачі заглиблювалися на 15-20 см в товщу води і вводилася відповідна поправка. Точність глибини становила 1 см. Профілі ехолотування закладалися в широтному напрямку. Відстань між профілями становило ~ 500 м. За профілем виміри глибин визначалися через кожні 100 метрів, і завірялися промірами мірним шестом з під'ятником і ручним лотом через кожні 500 м. У меншому обсязі проводилось безперервне ехолотування із записом в пам'ять приладу (до 30 хвилин безперервного запису). У районах каналів, насосних станцій, локальних структур рельєфу дна мережу вимірювань згущували.

Геодезична прив'язка здійснювалася за допомогою GPS-приймачів з виносної антеною GARMIN - 128 і LOWRANCE - LCX-15. Точність визначення місцеположення становила 10-15 метрів. Кількість і положення профілей ехолотування було визначено виходячи з вимог зйомки масштабу 1:25 000. Положення берегової лінії також фіксувалося за допомогою GPS.

При побудові ЦМР до опорних точок повинна бути підібрана модель, яка буде враховувати глобальні тренди в даних. Якщо в даних існує тренд, він являє собою не випадково (детерміновану) складову поверхні, яка може бути описана будь-якої математичною формулою. Тому побудова ЦМР розпочато з дослідницького аналізу вихідних даних інструментом аналізу тренда модуля Geostatistical Analyst [17]¹⁾.

Інструмент аналізу тренда проектує значення опорних точок на площині XZ і YZ і будує їх точкові графіки. Ці графіки можуть розглядатися як бічні проекції тривимірних даних. До точкових графіків на площинах проекцій підбираються поліноми, що апроксимують їх (рис. 4.1 і рис.4.2).

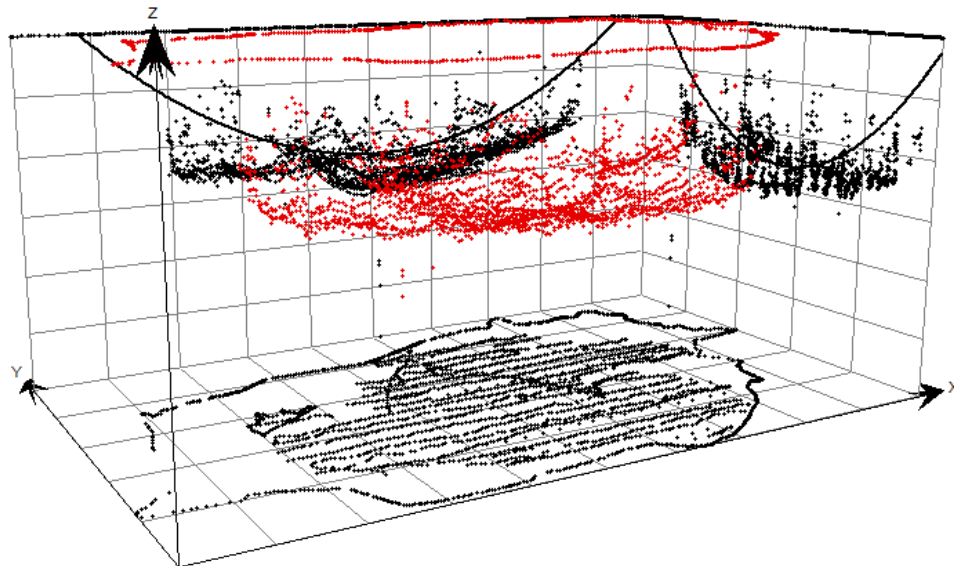


Рисунок 4.1 – Графік глобальних трендів глибин водосховища Кугурлуй

¹⁾[17] Фирсов, Г. Ю. Цифровые модели рельефа дна в электронной геодезии / Фирсов Г. Ю. // Геодезия и картография. 2008. № 4. С. 49–53.

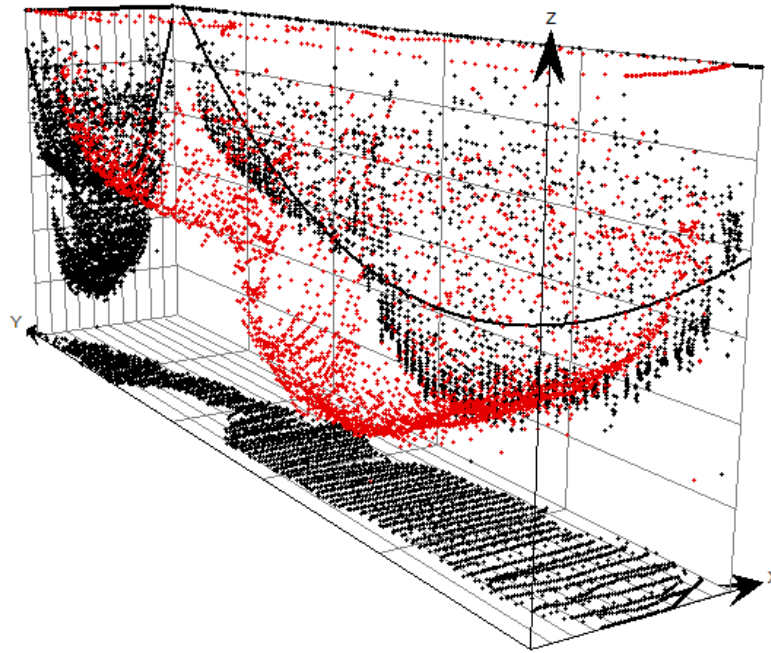


Рисунок 4.2 – Графік глобальних трендів глибин водосховища Ялпуг

Будемо враховувати цей тренд в моделях інтерполяції для правильної побудови ЦМР.

Щоб створити найкращу ЦМР необхідно змоделювати поверхні, використовуючи різні методи інтерполяції з різними параметрами. За критерій оптимальності побудованого геостатистичного шару приймається мінімум середньоквадратичної помилки при перехресній перевірці (E_{ms}). Для статистичних методів інтерполяції додатковим критерієм оптимальності є мінімум середньої стандартної помилки інтерполяції E_{st} .

Поверхня глибин водосховища Ялпуг-Кугурлуй побудована усіма доступними методами інтерполяції модуля Geostatistical Analyst з параметрами інтерполяції, заданими за замовчанням. Створені геостатистичні шари поверхонь мають помилки E_{ms} і E_{st} , що наведені у табл. 4.1.

Найкращі результати при перехресній перевірці для водосховища Ялпуг отримані при інтерполяції геостатистичними методами простого, ординарного і універсального крігінга. Для водосховища Кугурлуй найкращі результати отримані при використанні інтерполяції локальними поліномами.

Таблиця 4.1 – Результати моделювання з параметрами інтерполяції, заданими за замовчуванням

Метод інтерполяції	Середньоквадратична помилка (E_{ms})		Середня помилка інтерполяції (E_{st})	
	Ялпуг	Кугурлуй	Ялпуг	Кугурлуй
Ординарний крігінг	0,257	0,183	0,405	0,317
Універсальний крігінг	0,257	0,183	0,405	0,317
Локальними поліномами	0,558	0,130	–	–
Простий крігінг	0,256	0,206	0,383	0,348
Радіально-базисні функції	0,355	0,141	–	–
Зворотно зважених відстаней	0,355	0,162	–	–
Глобальним поліномом	1,432	0,898	–	–

З метою мінімізації E_{ms} оптимізуємо параметри інтерполяції кожного методу шляхом їх всіякого перебору, побудови моделей поверхонь з цими параметрами і порівняння отриманих моделей поверхонь між собою при перехресній перевірці. Результати перехресної перевірки представлені в табл. 4.2.

Оптимізовані поверхні мають мінімально можливі помилки E_{ms} і значно менші середні стандартні помилки інтерполяції геостатистичних методів E_{st} . Обчислені помилки характеризують якість досліджуваних інтерполяторів для побудови поверхні за вихідними даними.

Інтерполяція вихідних даних методом глобального полінома дає порівняно високі помилки при перехресній перевірці, дедалі менші зі збільшенням ступеня полінома. При інтерполяції поліномом 10-го ступеня $E_{ms} = 0,237$ і $0,597$ для водойм Кугурлуй і Ялпуг відповідно. Обчислені помилки інтерполяції говорять про те, що побудована модель занадто згладжена і непридатна для побудови ЦМР дна.

Таблиця 4.2 – Результати моделювання з оптимізованими параметрами інтерполяції

Метод інтерполяції	Середньоквадратична помилка (E_{ms})		Середня помилка інтерполяції (E_{st})	
	Ялпуг	Кугурлуй	Ялпуг	Кугурлуй
Ординарний крігінг	0,251	0,164	0,353	0,272
Універсальний крігінг	0,363	0,213	0,315	0,325
Локальними поліномами	0,281	0,128	–	–
Простий крігінг	0,241	0,187	0,264	0,103
Радіально-базисні функції	0,232	0,135	–	–
Зворотно зважених відстаней	0,316	0,162	–	–
Глобальним поліномом	0,597	0,237	–	–

Результати інтерполяції методом зворотно зважених відстаней повністю залежать від вибору статистики сусідства. Модуль Geostatistical Analyst дозволяє оптимізувати параметр методу в залежності від обраної статистики сусідства. Для цього методу обрана найкраща область пошуку сусідства – у вигляді еліпса. Малий радіус еліпса обраний рівним 500 метрам, великий – 1000 метрів. Цим забезпечується урахування геометрії водойми і захоплення опорних точок кожним еліпсом. У даного методу стандартна помилка інтерполяції E_{ms} становить 0,316 і 0,162 для водойм Кугурлуй і Ялпуг відповідно. Модель погано моделює поверхню рельєфу дна, що згинається.

При інтерполяції радіально-базисними функціями найкраща модель поверхні досягнута із застосуванням в якості радіально-базисної функції мультіквадріков. Оптимальною областю пошуку сусідства є еліпс з 8-ма секторами. Кут нахилу еліпса, його малий і великий радіуси збігаються з аналогічними параметрами методу простого крігінга, отже, можна вважати, що ці параметри підібрані з урахуванням просторової автокореляції даних. Радіально-базисні функції добре описують поверхню рельєфу дна, що згинається, тому

при перехресній перевірці поверхні, побудованої цим методом, отримана мінімальна середньквдратическая помилка інтерполяції серед усіх досліджуваних детермінованих методів ($Ems = 0,135$ і $0,232$ для водойм Кугурлуй і Ялпуг відповідно).

Розглянемо результати побудови ЦМР з використанням геостатистичних методів. У роботі аналізувалися методи простого, ординарного і універсального крігінга. У методів крігінга є можливість при інтерполяції враховувати помилку вимірювань значень опорних точок. При урахуванні цієї помилки крігінг згладжує поверхню, що моделюється, в опорних точках, а без урахування помилки він проводить поверхню точно через точки. Похибка вимірів в Geostatistical Analyst носить назву «ефект самородка».

Дослідним шляхом встановлено, що стосовно до вихідних даних урахування «ефекту самородка» веде до того, що значення глибин результуючої поверхні в опорних точках завищуються на обчислену модулем Geostatistical Analyst величину цього ефекту. Таким чином, крігінг згладжує значення глибин. У цій постановці завдання вважається, що значення глибин виміряні точно. З огляду на фізичну специфіку використовуваних даних, для побудови реалістичної моделі необхідно використовувати «жорсткий» інтерполятор, тому будемо застосовувати «жорсткі» форми крігінга, що не враховують помилки вимірювань.

За результатами моделювання геостатистичного методами інтерполяції модель універсального крігінга займає останнє місце ($Ems = 0,213$, $Est = 0,363$ для водойм Кугурлуй і Ялпуг відповідно). Найкращі результати при застосуванні простого крігінга. При порівнянні всіх побудованих моделей отримані наступні результати. Серед детермінованих методів перше місце займає метод інтерполяції радіально-базисними функціями для водойми Ялпуг ($Ems = 0,231$) і локальними поліномами для водойми Кугурлуй ($Ems = 0,128$); побудовані модель адекватно описує рельєф дна водосховища, але немає доказів їх достовірності. Оптимальні параметри детермінованих методів (загальні властивості, околиця пошуку і т.п.) для озера Ялпуг наведені на

рис. 4.3 і 4.4, для озера Кугурлуй на рис. 4.5 і 4.6. Побудовані поверхні глибин водосховищ наведені у додатку Б.

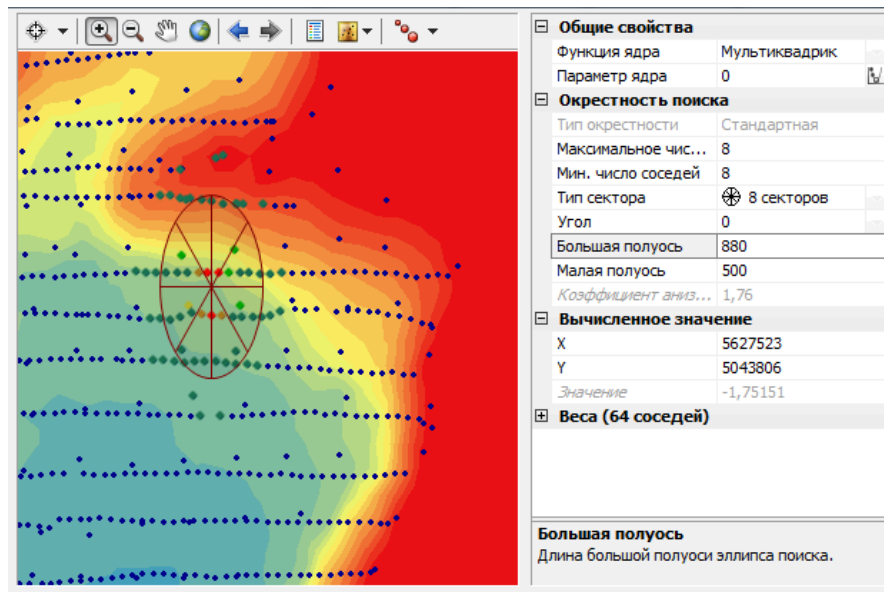


Рисунок 4.3 – Оптимальні параметри методу інтерполяції радіально-базисними функціями для водойми Ялпуг

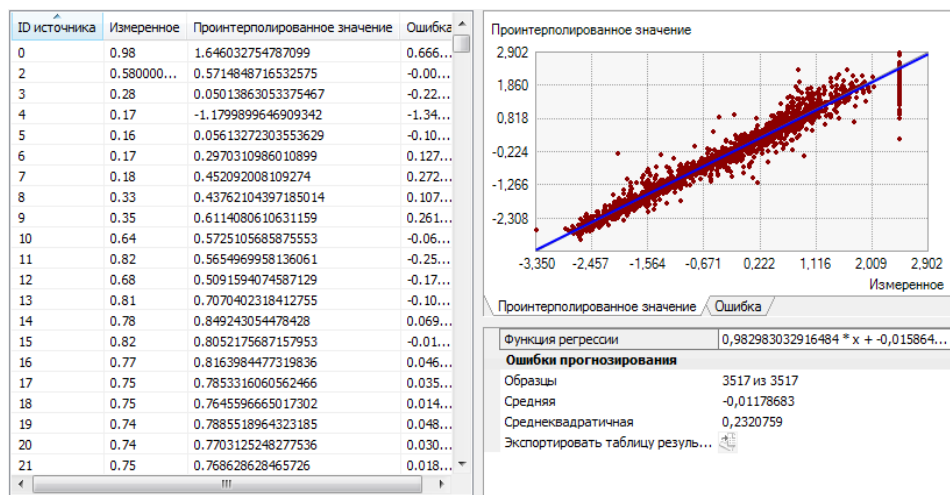


Рисунок 4.4 –Звіт про помилки методу інтерполяції радіально-базисними функціями для водойми Ялпуг

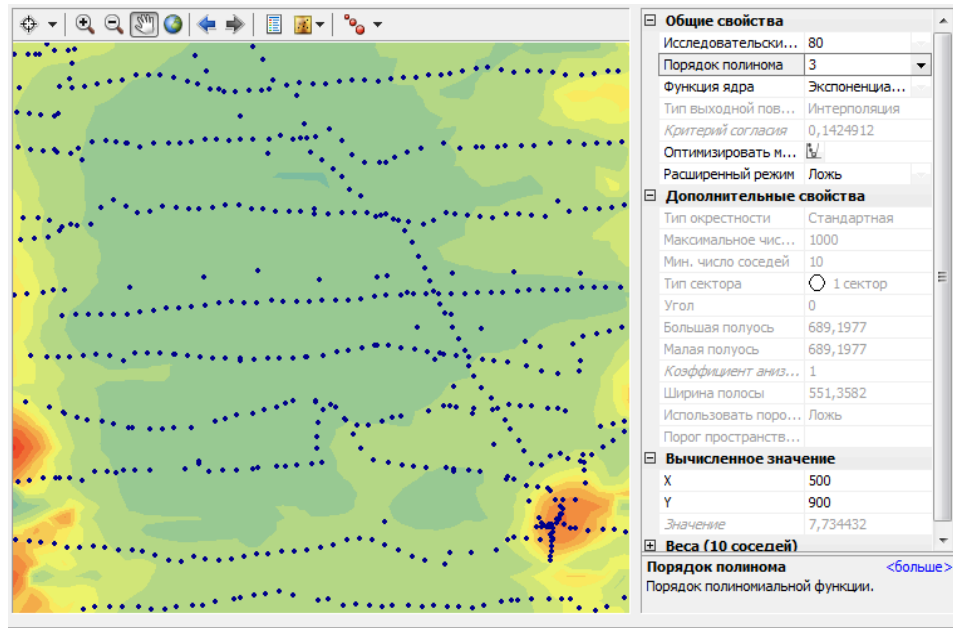


Рисунок 4.5 – Оптимальні параметри методу інтерполяції локальними поліномами для водойми Кугурлуй

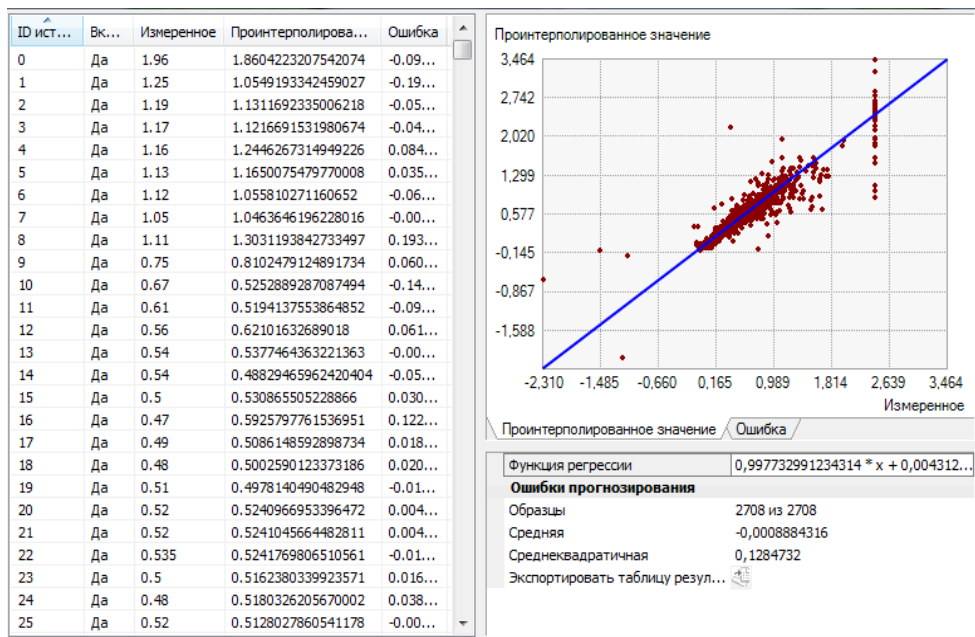


Рисунок 4.6 –Звіт про ошибки методу інтерполяції локальними поліномами для водойми Кугурлуй

Найкращим чином вихідну поверхню рельєфу дна водосховища інтерполює метод простого крігінга. Отримана при цьому модель адекватна тематичної постановці завдання. Модель має найменшу середньоквадратичне помилку при перехресній перевірці методів ($E_{ms} = 0,187$ і $0,241$ для водойм Кугурлуй і Ялпуг відповідно). Достовірність моделі підтверджується мінімальними середніми помилками крігінга ($E_{st} = 0,103$ і $0,264$ для водойм Кугурлуй і Ялпуг відповідно) і по карті її стандартних помилок, яка показує мінімальні стандартні відхилення глибин серед геостатистичних моделей (додаток В).

Оптимальні параметри методу простого крігінга для водойми Ялпуг наведені на рис. 4.7 і 4.8, звіт про помилки інтерполяції – на рис. 4.9, а для водойми Кугурлуй – на рис. 4.10 – 4.12. Побудовані поверхні глибин водосховищ наведені у додатку Б.

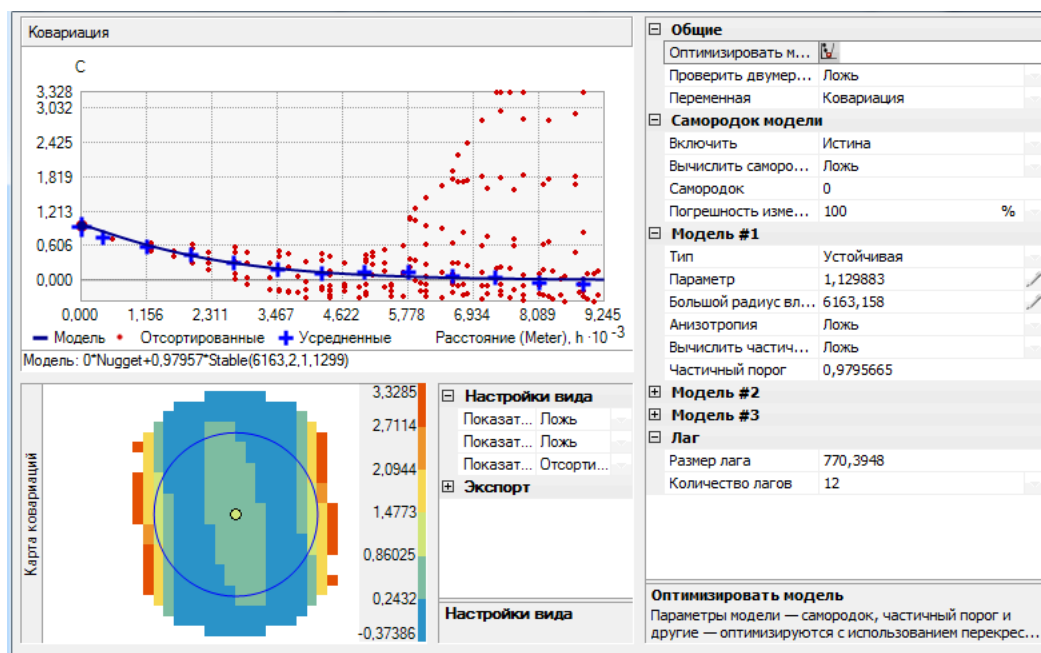


Рисунок 4.8 – Оптимальні параметри методу простого крігінгу для водойми Ялпуг (варіація/коваріація)

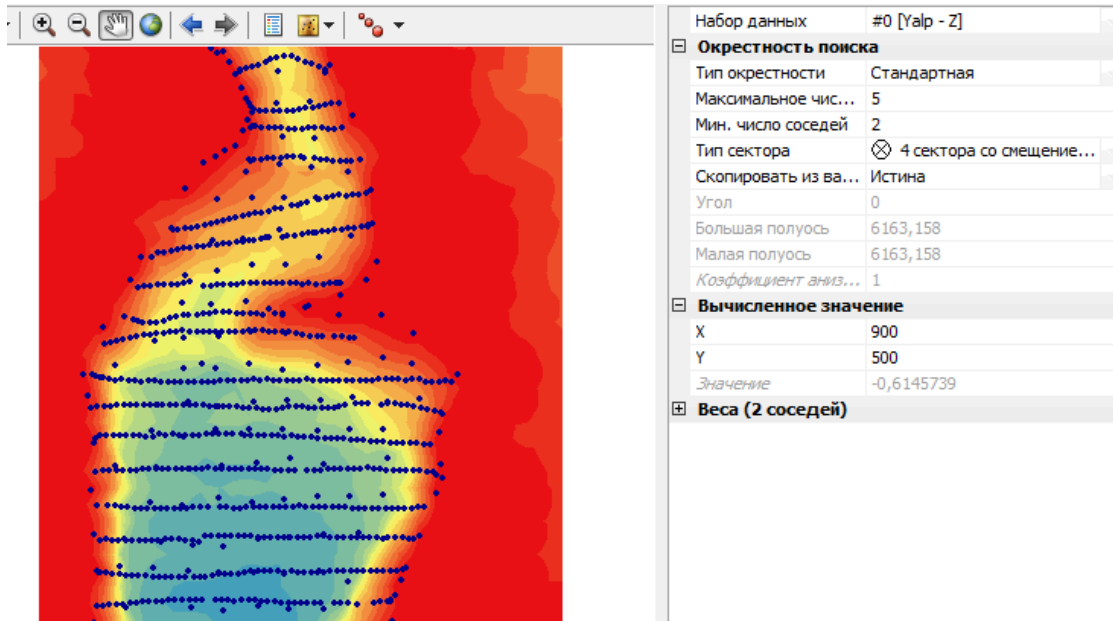


Рисунок 4.9 – Оптимальні параметри методу простого крігінгу для водойми Ялпуг (околиця пошуку)

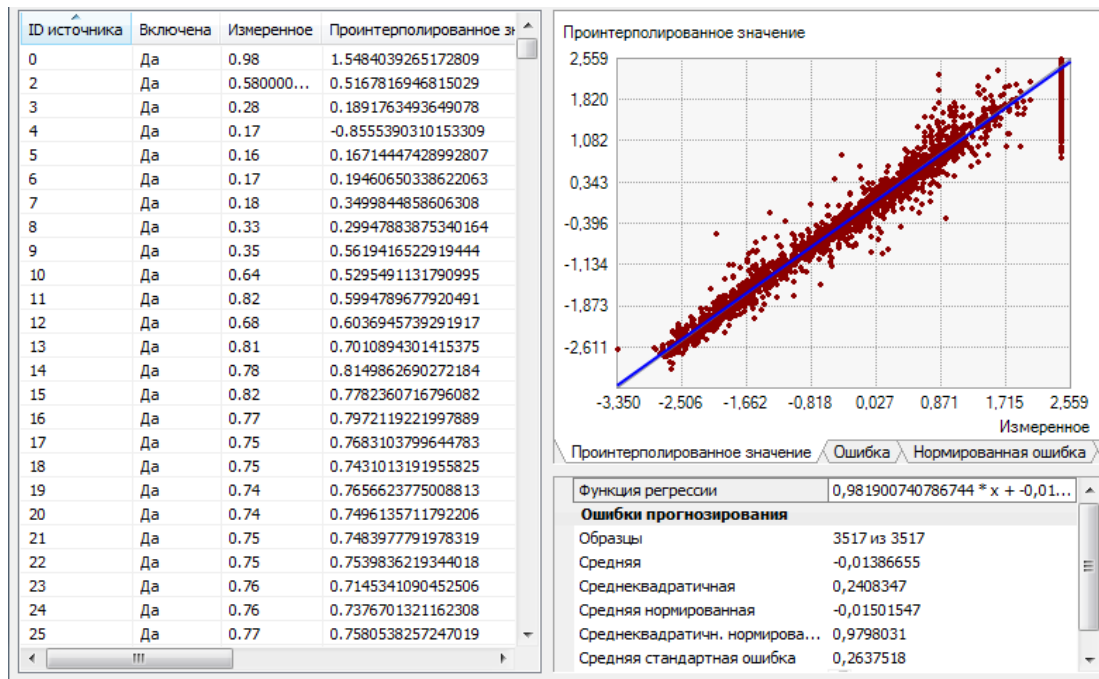


Рисунок 4.10 –Звіт про ошибки методу інтерполяції простого крігінгу для водойми Ялпуг

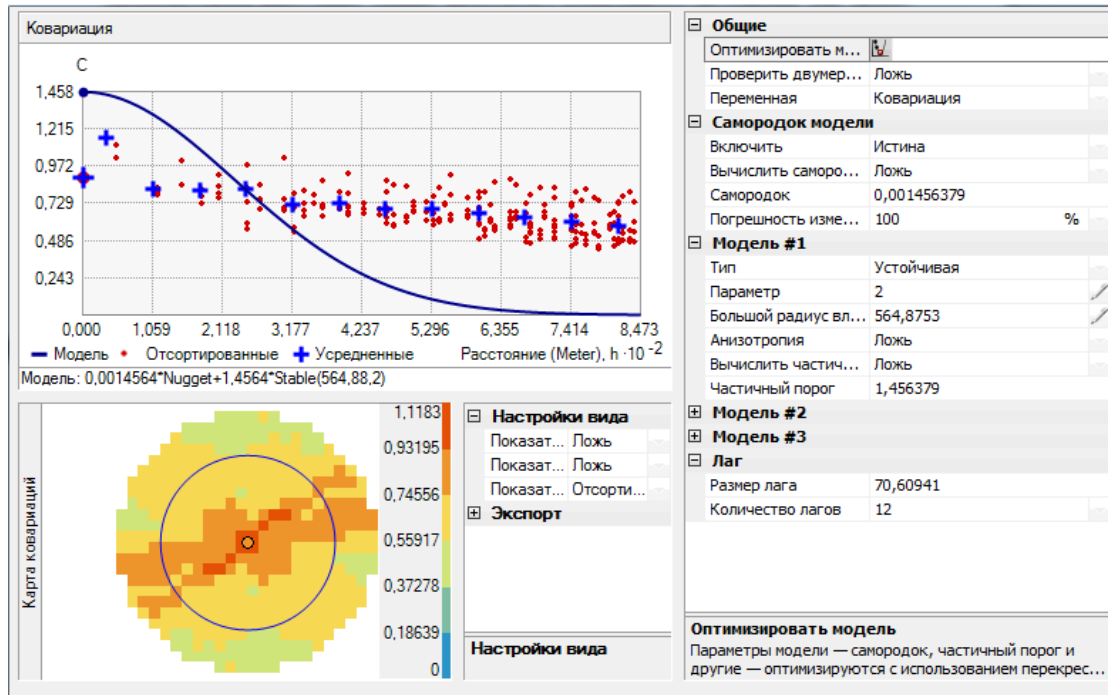


Рисунок 4.11 – Оптимальні параметри методу простого крігінгу для водойми Кугурлуй (варіація/коваріація)

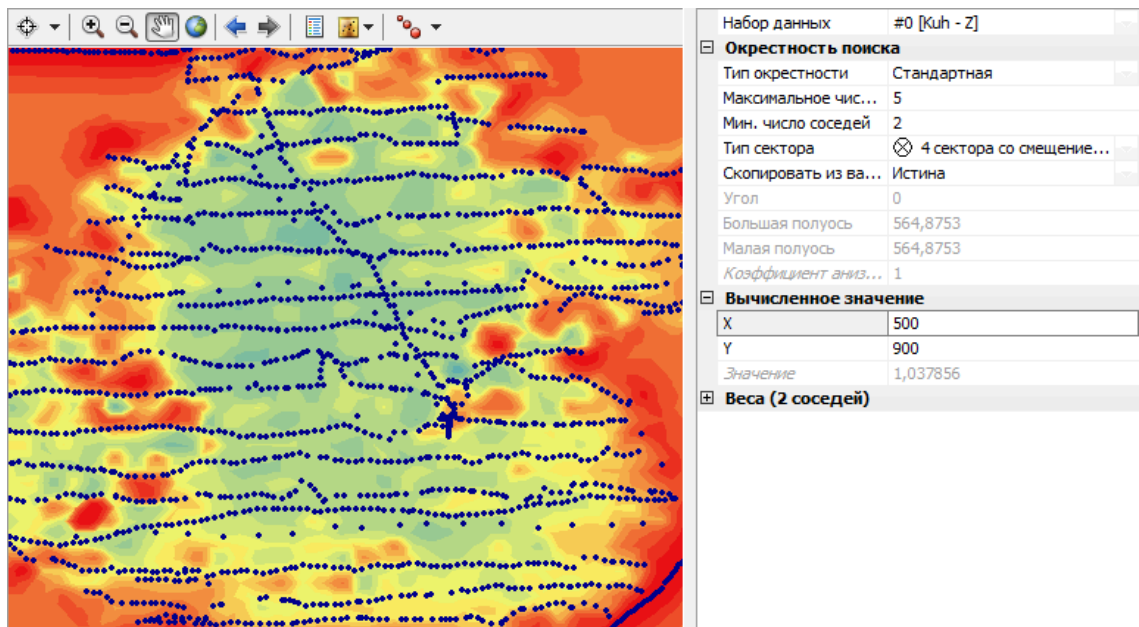


Рисунок 4.12 – Оптимальні параметри методу простого крігінгу для водойми Кугурлуй (околиця пошуку)

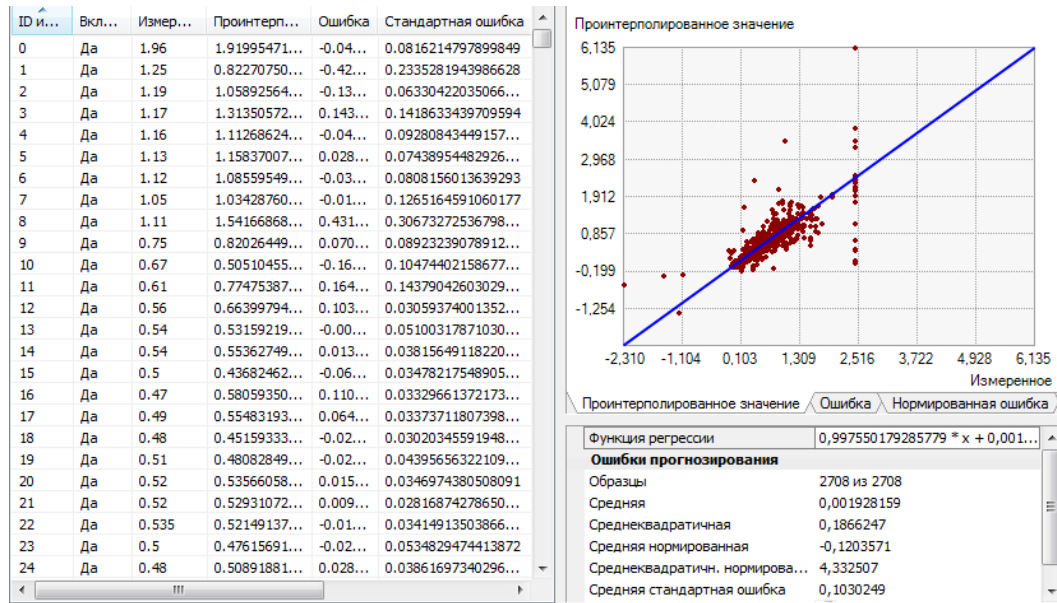


Рисунок 4.13 –Звіт про ошибки методу інтерполяції простого крігінгу для водойми Кугурлуй

4.2 Метод інтерполяції Topo to Raster

Серед великої кількості методів отримання растрових даних найбільш ефективним є інструмент «Топо в растр (Topo to Raster)» в складі ArcGIS. Цей метод інтерполяції спеціально розроблений для створення гідрологічно коректних ЦМР по точковим, лінійним і полігональним даними з використанням різних видів топографічних об'єктів. Метод призначений для створення растра шляхом інтерполяції значень висот з введенням обмежень, що забезпечують пов'язану дренажну структуру і коректне уявлення вододілів.

Процедура інтерполяції розроблена так, щоб скористатися загальнодоступними типами вхідних даних і відомими характеристиками висот поверхонь. Метод використовує ітеративний алгоритм інтерполяції кінцевих різниць. Він оптимізований, щоб підвищити обчислювальну ефективність методів локальної інтерполяції ЗЗВ без втрати безперервності поверхні методів

глобальної інтерполяції (крігінг і сплайн) [18]¹⁾. По суті, це дискретизований метод плоского сплайна, в якому змінено фактор шорсткості. Таким чином, скоригована ЦМР може відповідати різких змін поверхні (таким, як ущелини, гірські хребти, круті обриви) на відміну від інших загальноприйнятих інтерполяційних методів.

Побудуємо растрову модель з використанням цього інструменту для водосховища Ялпуг-Кугурлуй. На рис.4.14 наведено вікно з обраними параметрами інтерполяції для векторного шару з опорним точками глибин для водойми Ялпуг. Ідентичні параметри обрані і для водойми Кугурлуй.

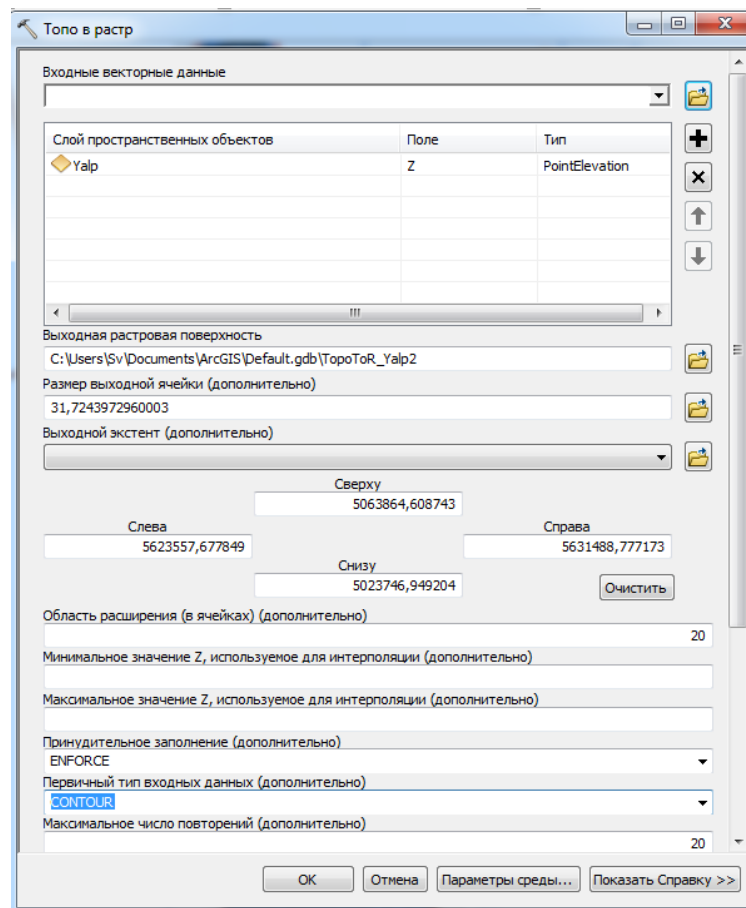


Рисунок 4.15 – Вікно інструменту Топо to Raster з вихідними параметрами для водойми Ялпуг

¹⁾ [18] Пьянков С.В., Калинин В.Г. Гидрография. Создание цифровых моделей рельефа для определения гидрографических характеристик рек и их водосборов: учеб. пособие. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2014. Ч. 1. 63 с.

Цифрові моделі рельєфу дна водойм побудованих з використанням інструменту для просторової інтерполяції Tоро to Raster наведені на рис.4.15 і рис.4.16.

ТороToR_Ялпуг, мБС

■	-3,268348455 - -2,506754186
■	-2,506754185 - -1,745159917
■	-1,745159916 - -0,983565648
■	-0,983565648 - -0,221971379
■	-0,221971379 - 0,53962289
■	0,53962289 - 1,301217159
■	1,30121716 - 2,062811428
■	2,062811429 - 2,824405697
■	2,824405698 - 3,585999966



Рисунок 4.15 – Цифрова модель рельєфу дна водойми Ялпуг

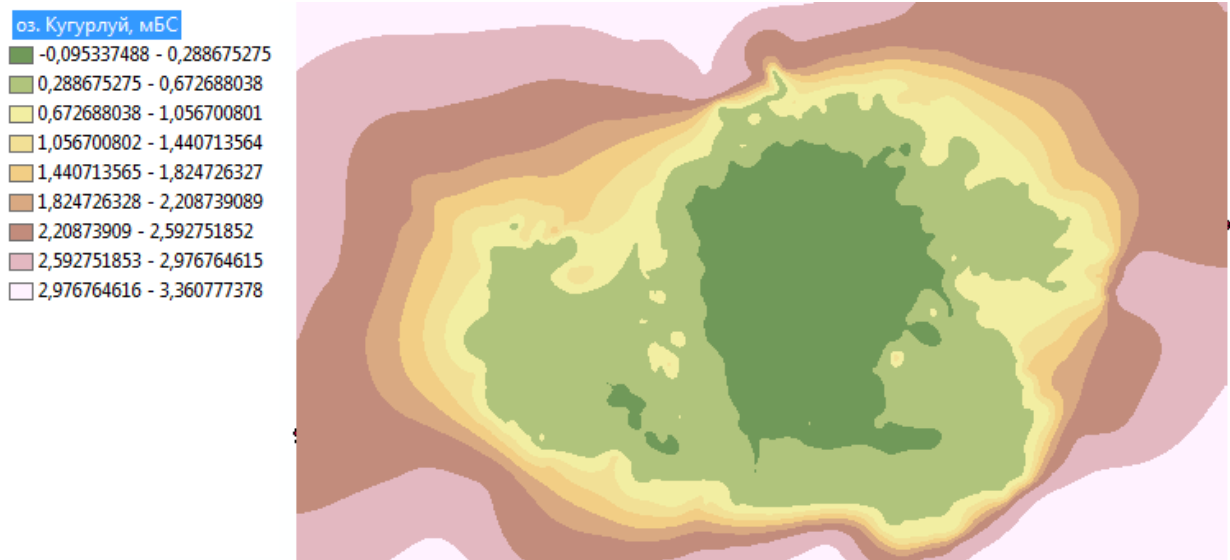


Рисунок 4.16 – Цифрова модель рельєфу дна водойми Кугурлуй

4.3 Створення 3D моделі рельєфу дна водосховища в пакеті ArcScene

Програма ArcScene, що входить до складу ГІС-пакета ArcGIS, призначена для побудови тривимірних моделей і комп'ютерних анімацій на основі даних ArcGIS. ArcScene дозволяє створювати документи – сцени в форматі SXD і зберігати їх на диску.

Першим кроком до створення тривимірної моделі є загрузка ЦМР (TIN або GRID) за допомогою команди Додати дані. Двічі клацнувши на назві даного шару ЦМР, слід викликати вікно Layer Properties і підібрати символи відображення моделі. Далі додамо в документ сцени векторні шари: водотоки і річки.

Нові дані в ArcScene завантажуються не на тривимірну модель рельєфу, а як би під неї – на площину з нульовою висотою. Щоб «обтягнути» модель векторними або растровими даними якогось шару, треба у вікні Властивості шару на закладці Базові висоти вибрати опцію Отримати висоти для шару з поверхні і вказати ту модель, яку планується «драпірувати».

Драпірувати можна також любим іншим зображенням, наприклад, космічним знімком, створюючи при цьому дуже реалістичні тривимірні сцени.

Першим кроком до створення тривимірної моделі є завантаження ЦМР (TIN або GRID) за допомогою команди Додати дані. Двічі клацнувши на назві доданого шару ЦМР, слід викликати вікно Layer Properties (Властивості шару) і підібрати символи відображення моделі. Нові дані в ArcScene завантажуються не на тривимірну модель рельєфу, а як би під неї – на площину з нульовою висотою. Щоб «обтягнути» модель векторними або растровими даними якогось шару, треба у вікні Властивості шару на закладці Базові висоти вибрати опцію Отримати висоти для шару з поверхні і вказати ту модель, яку планується «драпірувати» (рис. 14.17).

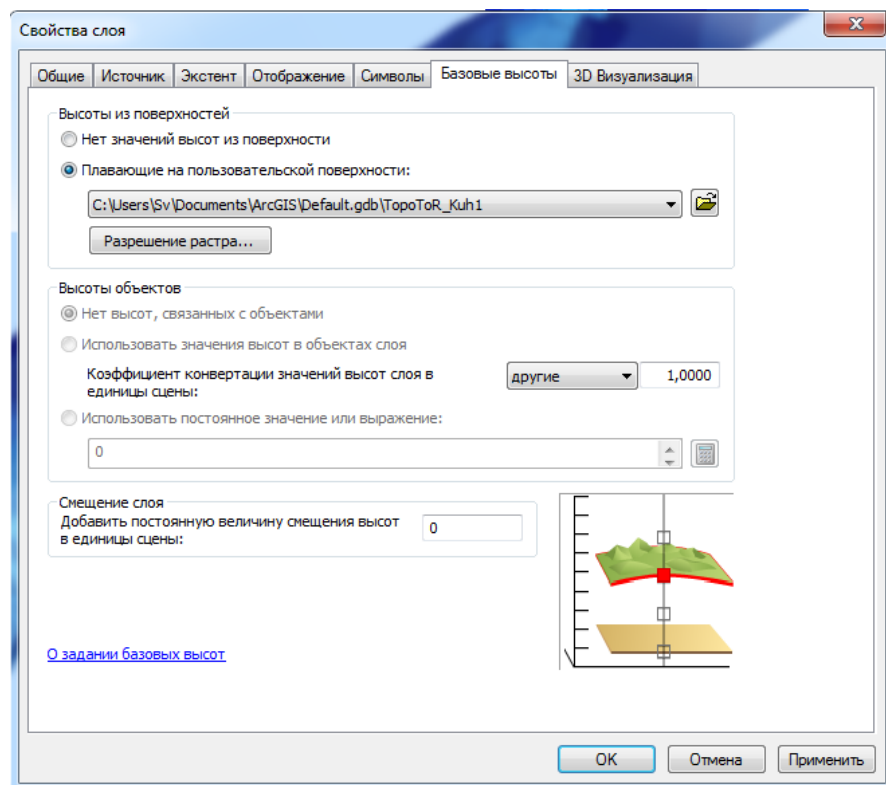


Рисунок 14.17 – Діалогове вікно Властивості шару

Масштабування моделі відбувається за допомогою миші. Для повороту моделі треба взяти інструмент Навігація і, утримуючи ліву кнопку миші,

змінити положення моделі. Виконавши подвійне клацання мишею на назві сцени (над шарами в таблиці змісту), слід викликати вікно Scene Properties (Властивості сцени). У цьому вікні 4 закладки:

- General – загальні властивості;
- Coordinate System – параметри проекції і системи координат;
- Extent – протяжність моделі в системі координат;
- Illumination – вибори параметрів освітлення моделі.

Треба перейти на закладку General (Загальні) (рис. 14.18) і встановити параметр Vertical Exaggeration (Вертикальне перебільшення) – коефіцієнт перевищення вертикального масштабу над горизонтальним. На закладці General встановити Background color – колір фону сцени. Поставити галочку Use as default, щоб обраний колір фону використовувався програмою за замовчуванням для нових сцен.

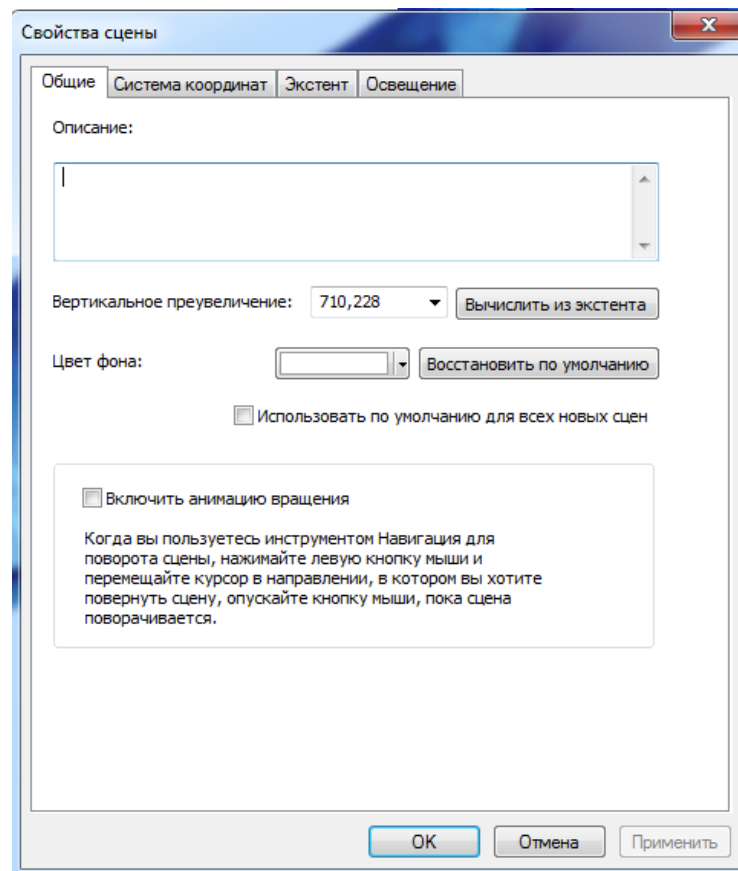


Рисунок 14.18 – Діалогове вікно Scene Properties (зкладка General)

Галочка Enable Animated Rotation (Включити анімацію вращення) робить можливим запуск анімації - обертання моделі плавним переміщенням миші з натиснутою лівою клавішею. Закладка Illumination (Освітлення) дозволяє встановлювати режими освітлення ЦМР в залежності від азимута і висоти Сонця.

Створені за цієї методикою 3D моделі рельєфу дна озер Ялпуг і Кугурлуй наведені на рис. 14.19 і рис.14.20 відповідно.

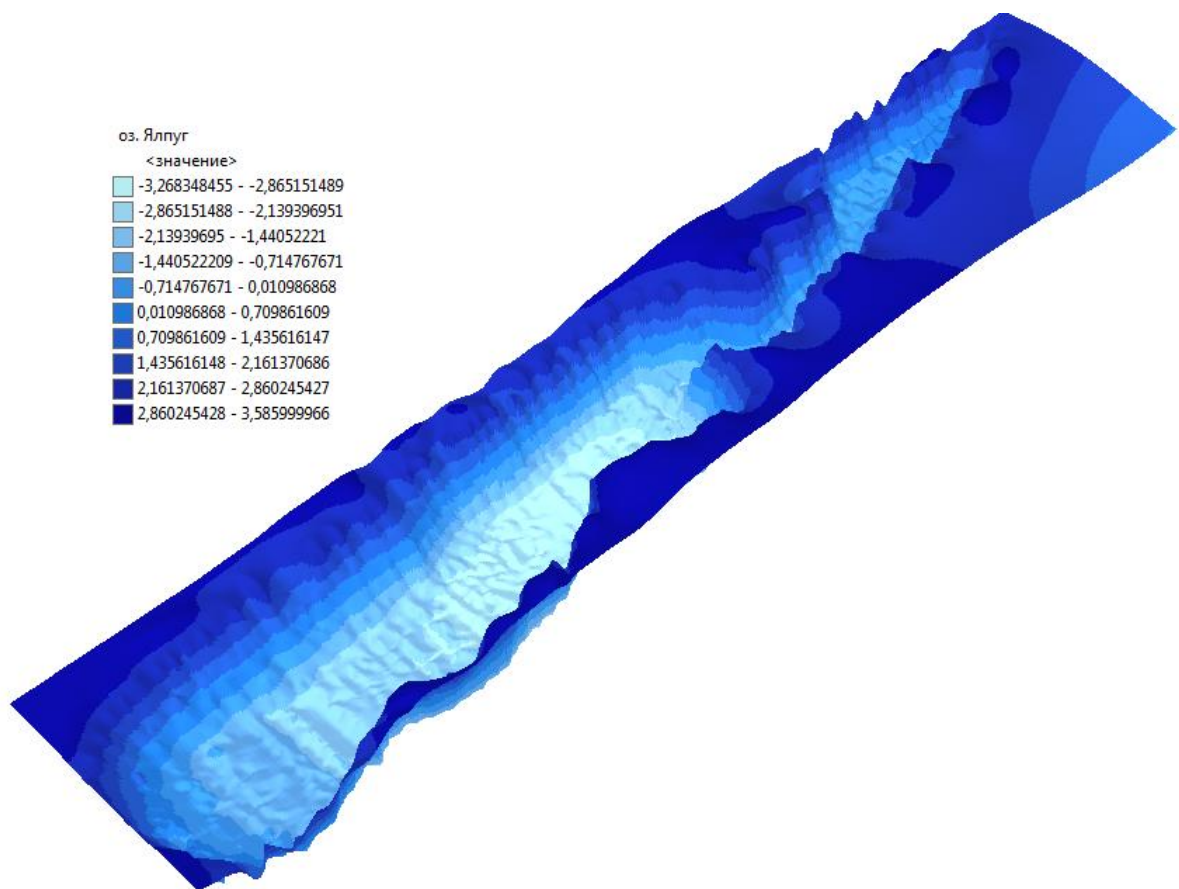


Рисунок 4.19 –3D модель рельєфу дна озера Ялпуг в пакеті ArcScene

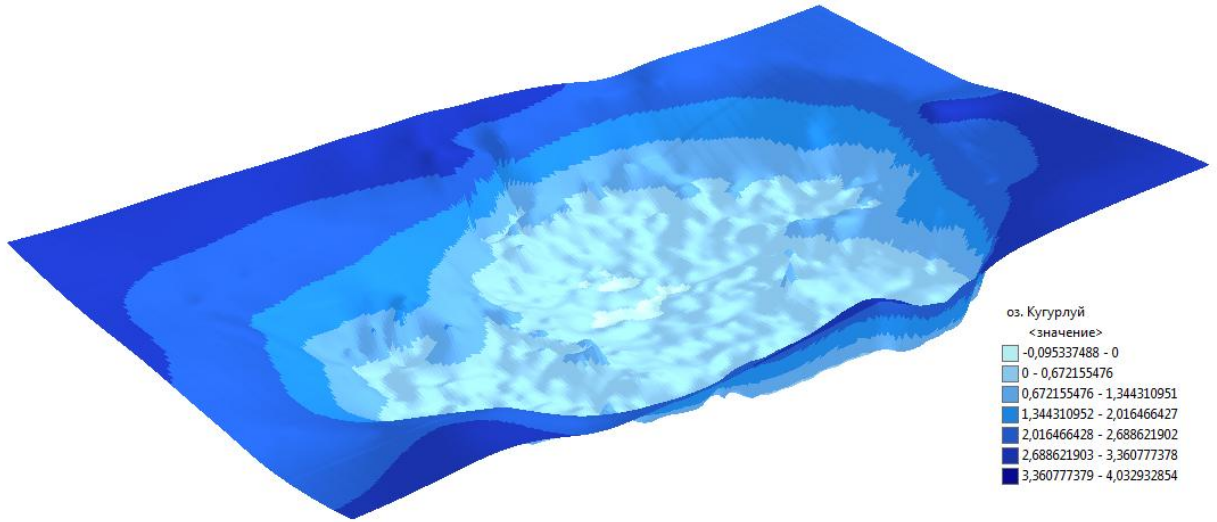


Рисунок 4.20 – 3D модель рельефу дна озера Кугурлуй в пакеті ArcScene

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглянути результати побудови цифрової моделі рельєфу дна Придунайської водойми Ялпуг-Кугурлуй за даними батиметричної зйомки їх глибин з використанням детерміністичних і геостатистичних методів інтерполяції. Були проаналізовані методи простого, ординарного і універсального крігінга.

Поверхні, отримані на основі одних і тих же даних різними методами інтерполяції, відрізняються за своїми характеристиками. У методів крігінга на відміну від детерміністичних методів є можливість при інтерполяції враховувати помилку вимірювань значень опорних точок. Для порівняння методів, оцінки очікуваних помилок і ступеня відповідності прогнозу реальним даним в роботі виконувалася процедура крос-валідації, яка полягає в тому, що з бази даних тимчасово вилучається одна точка і проводиться оцінка величини Z в даній точці з використанням всіх точок, що лишилися. Розраховане значення порівнюється з відомим. Потім процедура повторюється для кожної точки з бази даних.

В роботі перехресна перевірка різних методів інтерполяції буда виконана в програмі ESRI ArcGIS з використання спеціалізованого модулю Geostatistical Analyst.

За критерій оптимальності побудованого геостатистичного шару були прийняті мінімум середньоквадратичної помилки при перехресній перевірці (E_{ms}). Для статистичних методів інтерполяції додатковим критерієм оптимальності прийнятий мінімум середньої стандартної помилки інтерполяції E_{st} .

Поверхня глибин водосховища Ялпуг-Кугурлуй була побудована усіма доступними методами інтерполяції модуля Geostatistical Analyst з параметрами інтерполяції, заданими за замовчанням та з оптимальними параметрами встановленими шляхом їх вслякого перебору з метою мінімізації E_{ms} .

При порівнянні всіх побудованих моделей отримані наступні результати. Серед детермінованих методів перше місце займає метод інтерполяції

радіально-базисними функціями для водойми Ялпуг ($E_{ms} = 0,231$) і локальними поліномами для водойми Кугурлуй ($E_{ms} = 0,128$); побудовані модель адекватно описують рельєф дна водосховища, але немає доказів їх достовірності.

Серед геостатистичних методів найкращим чином вихідну поверхню рельєфу дна водосховища інтерполює метод простого крігінга. Отримана при цьому модель адекватна тематичної постановці завдання. Модель має найменшу середньоквадратичну помилку при перехресній перевірці методів ($E_{ms} = 0,187$ і $0,241$ для водойм Кугурлуй і Ялпуг відповідно). Достовірність моделі підтверджується мінімальними середніми помилками крігінга ($E_{st} = 0,103$ і $0,264$ для водойм Кугурлуй і Ялпуг відповідно).

В роботі також був розглянутий метод інтерполяції Торо to Raster спеціально розроблений ArcGIS для створення гідрологічно коректних ЦМР по точковим, лінійним і полігональним даними з використанням різних видів топографічних об'єктів. Метод призначений для створення растра шляхом інтерполяції значень висот.

В роботі побудовані тривимірні цифрові моделі рельєфу дна водойм за допомогою програма ArcScene.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Василюха, І. Ю. Особливості цифрового моделювання складних типів рельєфу // Геодезія, картографія та аерофотознімання. 2007. випуск 68. С. 269 – 279.
2. Мусин О.Р., Сербенюк С.Н. Цифровые модели "рельефа" непрерывных и дискретных географических полей // Банки географических данных для тематического картографирования. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. С.156 – 170.
3. Agishtein M.E., Migdal A.A. Smooth surface reconstruction from scattered data points // Computer & Graphics, 1991, vol.15, No.1, pp.29-39.
4. Akima H. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points // ACM Trans. Math. Software, 4,2 (June, 1978), pp.148-159.
5. Хромых, В. В. Цифровые модели рельефа: Учебное пособие / В. В. Хромых, О. В. Хромых. Томск : ТМЛ–Пресс, 2007. 164 с.
6. Журкин И.Г., Шайтура С.В. Геоинформационные системы. М.:КУДИЦ-ПРЕСС, 2009.272 с.
7. Кошкарев А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика. М.: Геодезиздат, 1993. 213 с.
8. Каневский М. Ф., Демьянов В. В. Введение в методы анализа данных по окружающей среде / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского М.: ВИНТИ, 1999. С. 2 - 12.
9. Савельева Е. А., Демьянов В. В., Чернов С. Ю. Детерминистические методы пространственной интерполяции / Общие проблемы охраны окружающей среды; под ред. Ю. М. Арского, М.: ВИНТИ, 1999. С. 13-25.
10. Жуков В. Т., Новаковский Б. А., Чумаченко А. Н. Компьютерное геоэкологическое картографирование. М.: Научный мир, 1999. 128 с.

11. Mcbratney A. B., Webster R. Choosing function for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates // J. Soil Science. 1986. № 37. P. 617-639.
12. Ковин Р.В, Марков Н.Г. Геоинформационные системы: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 175 с.
13. Скворцов А.В. Геоинформатика: Учебное пособие. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 336 с.
14. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. 128 с.
15. Сайт справочной системы ArcGIS. URL: webhelp.esri.com/arcgisdesktop (дата звернення 15.11.2019)
16. ArcGIS Resources. URL: <http://resources.arcgis.com/en/home/> (дата звернення 15.11.2019)
17. Фирсов, Г. Ю. Цифровые модели рельефа дна в электронной геодезии / Фирсов Г. Ю. // Геодезия и картография. 2008. № 4. С. 49–53.
18. Пьянков С.В., Калинин В.Г. Гидрография. Создание цифровых моделей рельефа для определения гидрографических характеристик рек и их водосборов: учеб. пособие. Перм. гос. нац. исслед. ун-т. – Пермь, 2014. Ч. 1. 63 с.

Д О Д А Т К И

ДОДАТОК А
Карти батиметричної зйомки



Рисунок А.1 – Батиметрична зйомка озера Ялпут

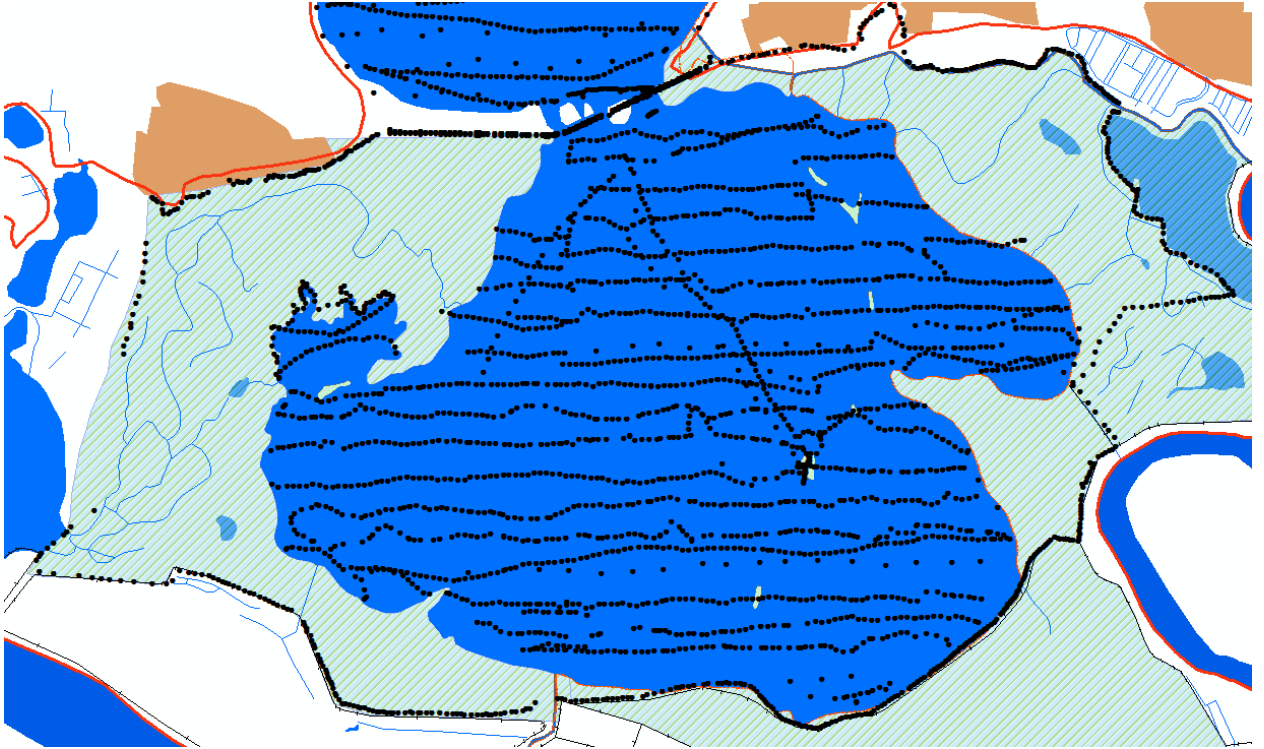


Рисунок А.2 – Батиметрична зйомка озера Кугурлуй

ДОДАТОК Б
Цифрові моделі рельєфу дна водойм

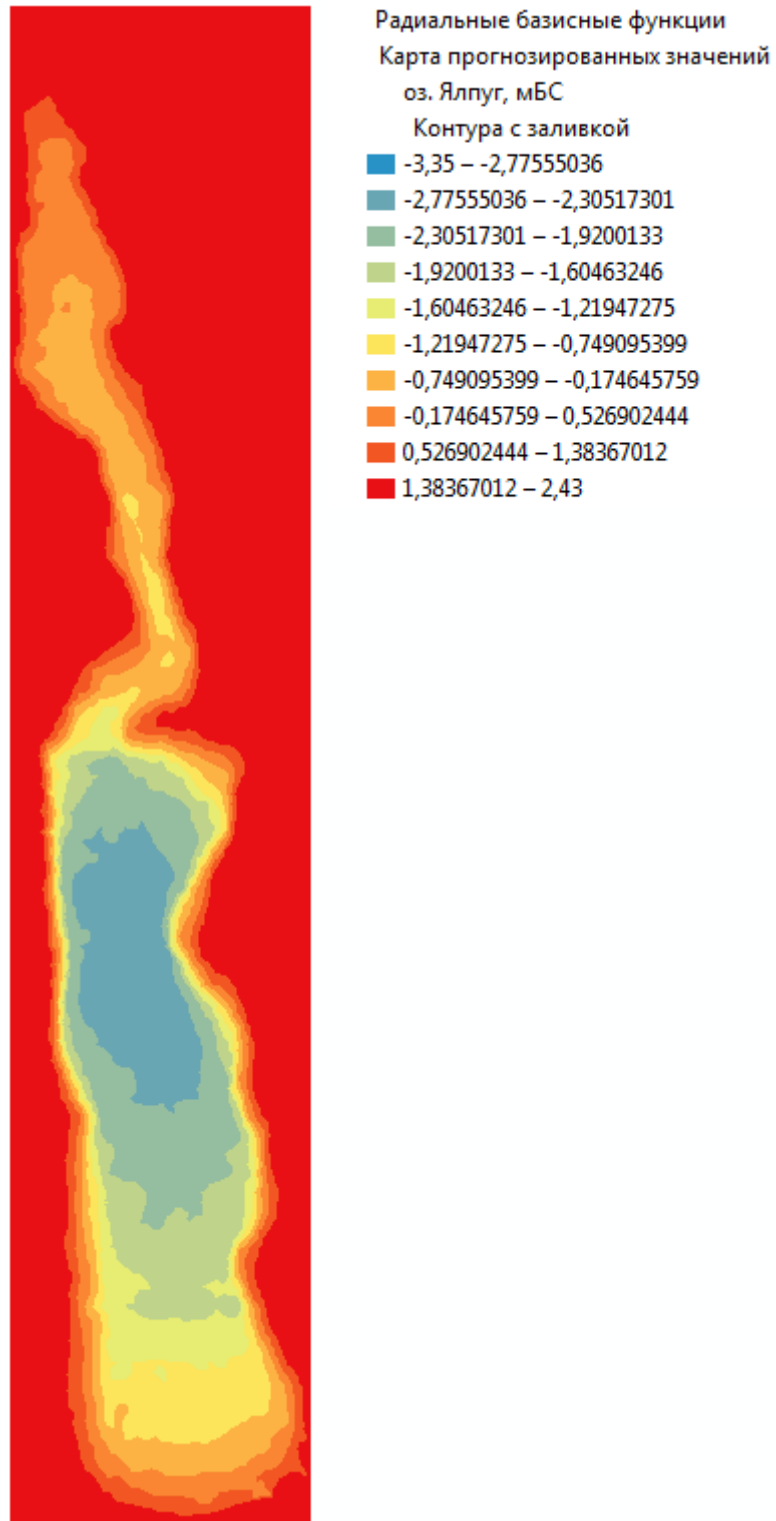


Рисунок Б.1 – ЦМР дна оз. Ялпуг, побудована методом інтерполяції
радіально-базисними функціями

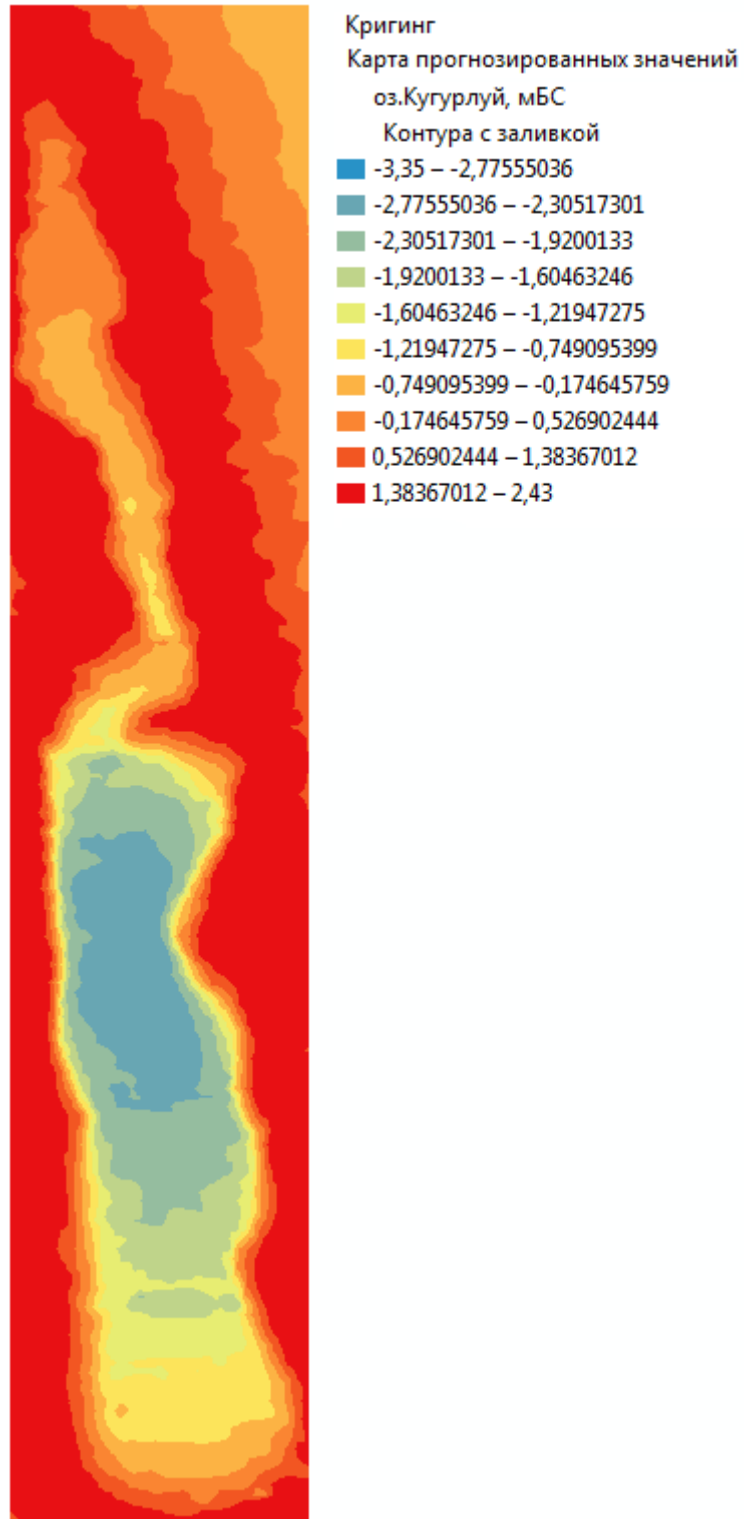


Рисунок Б.2 – ЦМР дна оз. Ялпуг, побудована методом інтерполяції простого крігінга

Интерполяция по методу локальных полиномов

Карта прогнозируемых значений

оз. Кугурлуй, мБС

Контур с заливкой

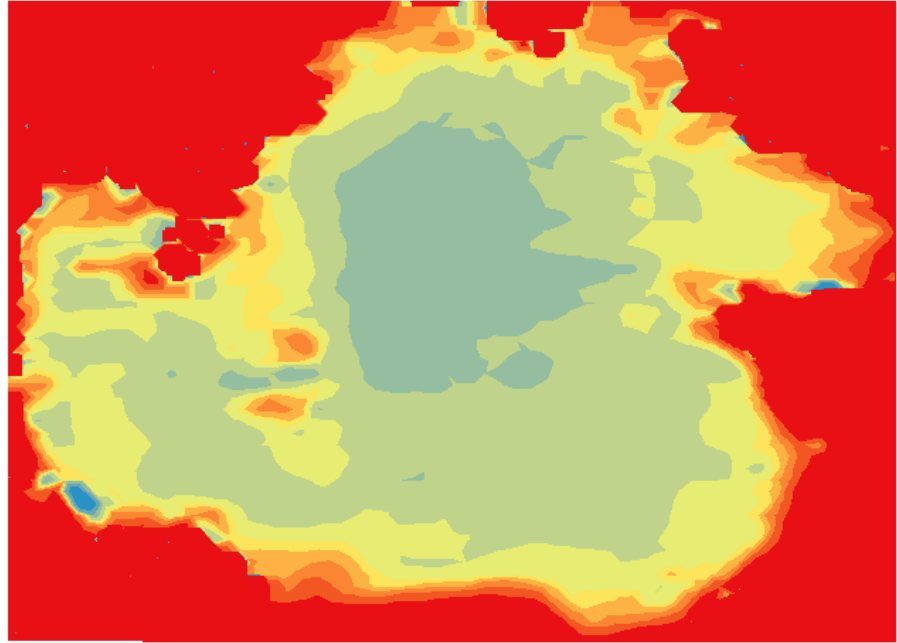
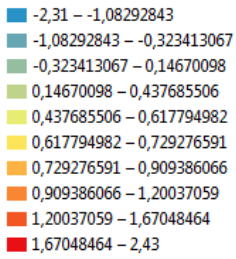


Рисунок Б.3 – ЦМР дна оз. Кугурлуй, побудована методом інтерполяції локальними поліномами

Кригинг

Карта прогнозируемых значений

оз. Кугурлуй, мБС

Контур с заливкой

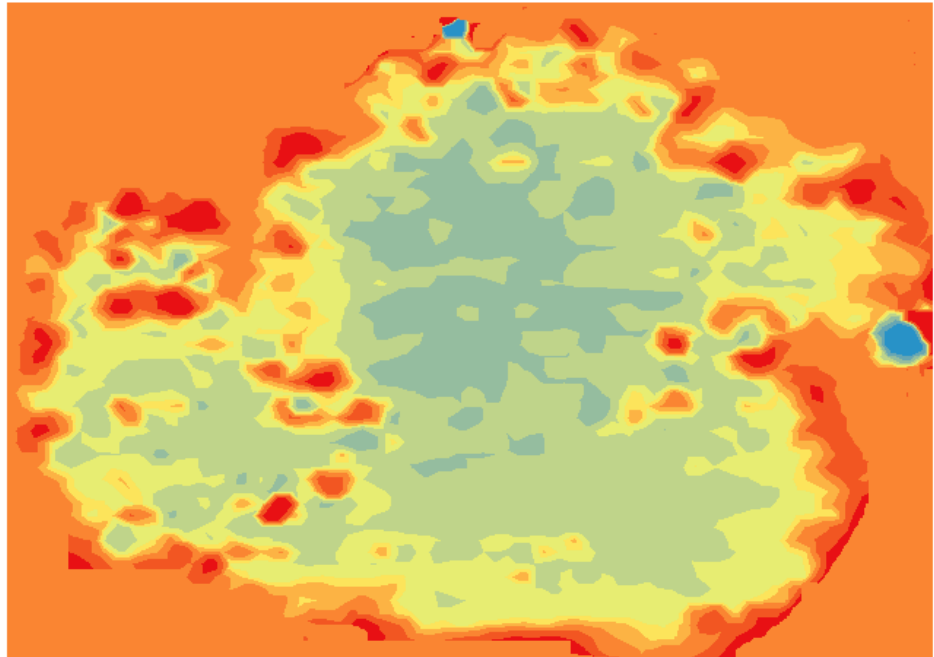
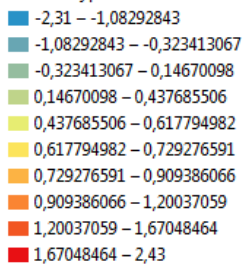


Рисунок Б.4 – ЦМР дна оз. Кугурлуй, побудована методом інтерполяції простого крігінга