

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА**

Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра фізичної географії та картографії

До захисту допустити
Зав. кафедри _____ доцент **Анатолій БАЙНАЗАРОВ**
« _____ » _____ 2024 р.

**СПОСОБИ ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ В ТРАДИЦІЙНОМУ ТА
ГЕОІНФОРМАЦІЙНОМУ КАРТОГРАФУВАННІ:
ІСТОРІЯ І ПЕРСПЕКТИВИ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Виконав: студентка 4-го курсу д.ф.н,
групи ГК- 41
спеціальність: 106 Географія
освітня програма: Картографія, геоінформатика
і кадастр

Аліна Володимирівна ОНИЩЕНКО

Науковий керівник:

професор, д. геогр. н. Віліна ПЕРЕСАДЬКО

Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою

_____ Голова ЕК **Олександр САВВІЧ**

_____ Секретар ЕК **Тетяна БУЛГАКОВА**

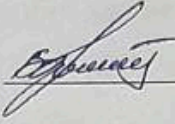
« _____ » _____ 2024 р.

Харків – 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В.Н. КАРАЗІНА

Факультет геології, географії, рекреації і туризму

Кафедра фізичної географії та картографії

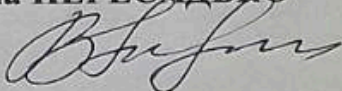
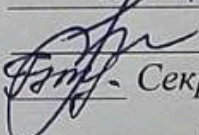
Зав. кафедри  До захисту допустити
доцент **Анатолій БАЙНАЗАРОВ**
« 17 » *серпня* 2024 р.

СПОСОБИ ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ В ТРАДИЦІЙНОМУ ТА
ГЕОІНФОРМАЦІЙНОМУ КАРТОГРАФУВАННІ:
ІСТОРІЯ І ПЕРСПЕКТИВИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

Виконав: студентка 4-го курсу д.ф.н,
групи ГК- 41
спеціальність: 106 Географія
освітня програма: Картографія, геоінформатика
і кадастр
Аліна Володимирівна ОНИЩЕНКО
Науковий керівник:
професор, д. геогр. н. Віліна ПЕРЕСАДЬКО

Аліна


Кваліфікаційна робота захищена з оцінкою
100 (відмінно)
 Голова ЕК **Олександр САВВІЧ**
Секретар ЕК **Тетяна БУЛГАКОВА**
« 20 » *серпня* 2024 р.

Харків – 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СПОСОБІВ ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ В ТРАДИЦІЙНОМУ КАРТОГРАФУВАННІ.....	6
1.1. Найперші способи зображення рельєфу на картах.....	6
1.2. Способи зображення рельєфу на планіметричній карті.....	12
1.3. Інноваційні підходи до зображення рельєфу у ХХ столітті.....	30
РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВІДОБРАЖЕННІ РЕЛЬЄФУ.....	33
2.1. Історія застосування геоінформаційних технологій при відображенні рельєфу.....	33
2.2. Сучасне застосування геоінформаційних технологій при створенні карт рельєфу й майбутні перспективи.....	39
РОЗДІЛ 3. СТВОРЕННЯ КАРТОГРАФІЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ СПОСОБОМ ШТРИХУВАННЯ В ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ТРАДИЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ	52
3.1. Існуючі реалізації способу штрихування в геоінформаційних системах.....	52
3.2. Розробка алгоритму побудови способу штрихування в геоінформаційній системі QGIS.....	61
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. З давніх часів зображення рельєфу на картах викликало питання, адже рельєф є однією з найголовніших характеристик поверхні нашої планети та інших небесних тіл. Найбільш здібні картографи намагалися передати тривимірний рельєф на двовимірній площині, використовуючи всі можливі досягнення розвитку суспільства на певному етапі, оскільки зображення рельєфу на карті має велике значення у різних галузях, включаючи географію, містобудування, військову справу, тому що дає можливість аналізувати особливості території. Але перенести тривимірний рельєф на площину виявилось нелегкою справою, адже зважаючи на різний технологічний розвиток, обмежений розмір площини, на якій зображується рельєф, досягти карт високої точності важко, при цьому враховуючи баланс між наочністю рельєфу та читанням інших деталей карти. Саме тому зображення рельєфу відноситься до найстаріших й водночас незмінно актуальних проблем картографії.

Способи зображення рельєфу розвивалися в тісному зв'язку з практичними потребами людства на різних етапах розвитку науки і техніки, їх вибір залежав від конкретних історичних періодів. Тому існує десятки різноманітних способів зображення рельєфу, так є умовно-перспективний спосіб, спосіб штрихування, горизонталей, світлотіньової пластики і так далі.

Сучасні технології змінили уявлення про відображення рельєфу, адже вони відкрили нову еру в картографії. Геоінформаційні системи дозволяють створювати достатньо точні карти рельєфу буквально за декілька годин, використовуючи цифрові моделі рельєфу, при цьому знижуючи трудомісткість та суб'єктивність дослідження. Окрім цього, сучасне програмне забезпечення дає можливість створювати тривимірні моделі рельєфу, цим самим вирішуючи головну проблему у відображенні рельєфу на двовимірній площині. Але в історії картографії існують способи зображення рельєфу, що вражають навіть зараз у вік

комп'ютерних технологій, особливо це відноситься до карт, які виконані способом штрихування.

Здається, що питання картографування рельєфу має бути повністю вивчене, але деякі прогалини в історичному розвитку, недостатня вивченість питання зображення рельєфу на картах під час становлення геоінформаційних систем, неповна автоматизація традиційних способів зображення рельєфу в геоінформаційних системах обумовили вибір теми для наукового дослідження.

Методологічною основою роботи є класичні праці по способам картографування рельєфу Е. Імгофа, Г. Гюгера, Г. Кюммерлі, по аналізу рельєфу П. М. Горішного, І. Г. Черваньова, І.П. Ковальчука, С. В. Кострікова, нормативно-законодавчі акти.

Мета і задачі дослідження. Головною метою дослідження є аналіз способів зображення рельєфу як у традиційному, так і в геоінформаційному картографуванні, та розробка алгоритму побудови способу штрихування на основі сучасних технологій.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі задачі:

1. проаналізувати наукові публікації, що стосуються способів зображення рельєфу, особливостей їх розвитку, з урахуванням впливу технологічних інновацій;
2. описати картографування рельєфу під час становлення геоінформаційних систем;
3. дослідити роль геоінформаційних систем при відображенні рельєфу на сучасному етапі та оцінити перспективи в майбутньому;
4. виявити відмінності зображення рельєфу у традиційному та геоінформаційному картографуванні;
5. розробити доступний для всіх алгоритм створення картографічного зображення рельєфу способом штрихування на основі традиційного картографування та здійснити його практичну реалізацію, щоб переконатися в його ефективності.

Об'єктом дослідження є рельєф земної поверхні.

Предметом дослідження – картографічні способи зображення рельєфу.

Методи дослідження. У процесі наукового дослідження використовувалися такі загальнонаукові методи як: аналіз і синтез (під час пізнання способів зображення рельєфу, їх змін, розвитку, взаємозв'язків – рельєф розглядається як єдине ціле, а для його зображення на картах вже використовують різні способи); системний підхід (при вивченні особливостей картографування рельєфу). А також використання таких спеціальних методів, що формуються на основі загальнонаукових методів: картографічний (під час використання карт для дослідження різних способів зображення рельєфу й аналізу можливості здійснення за картами вимірювань); історичний (при вивченні виникнення, формування способів зображення рельєфу, тенденцій та закономірностей їх розвитку); порівняльно-картографічний (при виявленні подібності і відмінності в традиційному та геоінформаційному картографуванні рельєфу); просторово-подібне моделювання (при вивченні цифрових моделей рельєфу, створення картографічного зображення в геоінформаційній системі).

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до вивчення історії розвитку способів зображення рельєфу на картах, від традиційних ручних методів до геоінформаційних, а також у детальному описі алгоритму побудови способу штрихування, що буде доступним та актуальним для всіх.

Практичне значення роботи полягає, насамперед, в рекомендаціях стосовно вдосконалення способів зображення рельєфу в картографії, їх практичного використання в різних сферах діяльності людини (господарська діяльність, інженерно-геоморфологічні роботи тощо). Це дозволить підвищити рівень оформлення картографічних зображень – більша наочність, достовірність, легке сприйняття, краща виразність. Окрім цього описаний автором алгоритм побудови способу штрихування дозволить усім мати можливість зображувати рельєф на картах таким способом.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СПОСОБІВ ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ В ТРАДИЦІЙНОМУ КАРТОГРАФУВАННІ

Зображення рельєфу на картах завжди було викликом для картографів, оскільки рельєф – це одна з найголовніших характеристик земної поверхні та його правильне відображення на карті є одним з основних завдань. Протягом історії картографування існувало багато різних способів зображення рельєфу, кожен з яких показував технологічний розвиток, що був на момент застосування певного способу, та які мистецькі підходи були для його зображення.

Передача тривимірної природи рельєфу на двовимірній площині є достатньо складним завданням, що вирішується завдяки використанню різних способів зображення рельєфу. Для повного розуміння потрібно сказати, а що ж таке спосіб зображення рельєфу. Тож спосіб зображення рельєфу на карті – це методика, що дозволяє відобразити географічні особливості земної поверхні, використовуючи існуючі на певний момент часу технології збору даних, їх візуалізації й передачі даних про рельєф. Кожен з способів зображення рельєфу має відповідати точності географічного уявлення у певний період розвитку, просторово-часовим характеристикам і звичайно передавати інформацію про морфометричні особливості території, що картографується. Цей розділ дасть розуміння, які способи зображення рельєфу існували в минулому, починаючи з найдавніших часів і закінчуючи сучасністю.

1.1. Найперші способи зображення рельєфу на картах

Однією з найдавніших карт, що дійшла до нас, є карта Месопотамії, створена близько 2400 років до нашої ери. Вона хоч і була видряпана на глиняній дошці, проте вже мала певне відображення рельєфу. Гори на ній показані у вигляді бічних проекцій, тобто так як ми можемо побачити їх у перспективі, дивлячись на них знизу ввєрх. Подібне відображення рельєфу використовувалося

протягом довгого часу. Такі бічні проекції можна зустріти на картах Античної доби, Середньовіччя. Широко вони використовувалися і в епоху Відродження, коли почався активний розвиток картографії, та переважали на більшості карт до кінця XVIII століття. Навіть у XXI столітті можна зустріти на картах цю просту графічну форму, що показує гори, але зараз таке зображення використовується переважно для досягнення естетичності. Тобто цей спосіб відображення рельєфу використовувався протягом століть, головною причиною цього був недостатній розвиток картографування та не було власне потреби показувати гори точніше, ніж вони були зображені. На картах ці бічні проекції гір часто використовували просто для заповнення пустого місця або ж для того, щоб позначити вододіли [19].

Цей спосіб зображення рельєфу отримав назву умовно-перспективний. З кожним століттям відображення рельєфу цим способом удосконалювалося, так на найперших картах це були звичайні «кротовини» – простий закруглений вид збоку, переважно розташовувалися ланцюжками. Таке зображення можна побачити на карті Месопотамії, що згадана вище. Але через нагромадження таких куполоподібних зображень гір часто вони зливалися в один масив, накладалися один на одного і поступово вони відійшли у минуле. Спочатку змінилася їх техніка нанесення, вони були нанесені до напрямку зору користувача карти. Потім змінилася й форма представлення гір, вони відображались не тільки рядами, а й одним за одним, створюючи візерунок риб'ячої луски. Крім того з'явилася нова геометрична форма, рельєф стали відображати конусоподібними загостреними фігурами, що справді були схожі на гори.

Також необхідно вказати новаторські підходи на той час, а саме у XV столітті. Гори відображались згідно з правилами перспективи, на передньому плані, тобто на нижній частині карти, вони були більшими, а на задньому плані, верхній частині, їх розміри зменшувалися. Ще одним інноваційним підходом було використання тіні, тобто геометричні форми були затінені, переважно зліва.

Умовно-перспективний спосіб зображення рельєфу є достатньо наочним, оскільки можна одразу дивлячись на карту сказати, де у нас гірська місцевість. Але, на жаль, цей спосіб є неточним, тому що не дозволяв визначити основні геометричні характеристики рельєфу (його висоту, кут нахилу схилу і так далі). Часто цей спосіб поділяють на штриховий, коли форми рельєфу викреслювалися тушшю (рис. 1.1.1), та живописний, коли рельєф був написаний художником маслом (рис. 1.1.2).

Уже на деяких картах пізнього Середньовіччя можна побачити заміну графічних форм, таких як кротовини, на символи у вигляді багат шарових плит. Такий приклад можна побачити на рукописній карті Птолемея 1454 року з атласу Західних Альп (рис. 1.1.3). На цьому картографічному зображенні вперше за всю історію були використані лінії, що визначають форму схилу. Також було наявне освітлення гір.



Рис. 1.1.1. Карта швейцарського озера Валензе з оформленням рельєфу штриховим способом. Робота Габрієля Боденера. 1720 р. [54]



Рис. 1.1.2. Живописна карта острова Сицилія з Галереї географічних карт в Папському палаці Ватикану. Робота Ігнатія Данті. 1850 р. [50]



Рис. 1.1.3. Фрагмент карти Західних Альп.
З рукописного атласу Клавдія Птолемея. 1454 р. [19]

У XVI столітті розпочинається новий етап у розвитку умовно-перспективного способу зображення рельєфу, тому що для карт почали вимагати більшої детальності. У цей період зародилися перші методи проведення топографічної зйомки, де використовувався компас та мірна стрічка, також обиралися опорні точки (наприклад, шпилі церков). Це поклало початок еволюції способів зображення рельєфу на карті, щоб зобразити рельєф як можна точніше.

Великий внесок у розвиток умовно-перспективного способу зображення рельєфу зробили художники. Найвідомішими й найбільш ранніми прикладами є карти Леонардо да Вінчі 1503 року (рис. 1.1.4). Вперше на карті форми рельєфу були показані не окремо, а безперервно. Таке відображення рельєфу майже на півстоліття випередило своїх послідовників, бо тільки тоді гори почали відображатися наче з висоти пташиного польоту.

Кarti в цей період вже не були одноманітними, вони стали графічно розподіленими, але вся місцевість була цілісно відображена. На картах можна чітко побачити гірську місцевість, водні об'єкти, поселення, що поєднуючись разом дають нам цінну інформацію про відображену територію.



Рис. 1.1.4. Тоскана. Робота Леонардо да Вінчі. 1503 р. [35]

Подальший розвиток способів зображення рельєфу пов'язаний з винайденням гравюри. У Х столітті в Китаї була винайдена технологія гравюри, що отримала назву ксилографія або гравюра на дереві. Перші друковані карти з'явилися у XV столітті й власне були гравюрою на дереві (рис. 1.1.5). Але з подальшим розвитком технологій та збільшенням вимог щодо відображення рельєфу з'явилася гравюра на міді. Використання мідних пластин у картографуванні дозволяло робити більш тонші, рівніші й водночас щільніші лінії рельєфу. Гравюра на міді значно збільшила можливості зображення топографічного змісту на карті. Загалом поділялася на різцеву, коли на металі голкою видряпувалися необхідні елементи, та офорт, що представляв собою хімічну дію на пластину. У 1477 році в Болоньї технікою гравюрою на міді було надруковано атлас Птолемея. Зі збільшенням детальності карти, виконаній у цій техніці, часто відбувалося погіршення навичок малювання, у результаті карта ставала надмірно уточненою і втрачала ясність, було важко її прочитати [9].



Рис. 1.1.5. Карта Чорного моря, Північного Причорномор'я і Криму.

Гравюра на міді з ручним акварельними підфарбуванням.

Робота Абрахама Ортелиуса. 1590 р. [32]

Картографічні дослідження, покращення методів топографічного знімання призвели до прогресу в картографуванні рельєфу в XVII – XVIII століттях. У цей період з'явилося багато різних способів зображення рельєфу, оскільки відбувся перехід на планіметрично правильну основу. Так, з'явився спосіб штрихування, горизонталей, світлотіньової пластики і тому подібні, що будуть розглядатися далі.

1.2. Способи зображення рельєфу на планіметричній карті

З розвитком технологій, зі зростанням вимог щодо точності відображення характеристик земної поверхні на карті перед картографами постало питання, а як же відобразити рельєф на планіметрично правильному зображенні так, щоб показати його істинний вид. Однак виявилось, що існуючі на той момент способи відображення рельєфу на картах не змогли цього зробити. Тому виникла необхідність створити спосіб, що буде показувати рельєф на планіметричній карті. Ось чому у XVII столітті з'являється спосіб штрихування.

На початковому етапі розвитку даного способу зображення рельєфу штрихові лінії були різними: відрізнялася їх товщина та довжина, вони були неузгоджені між собою, хоч і зображувалися по лінії найкрутішого схилу. На рівнинний рельєф штрихування не наносилося. Внаслідок відсутності стандартизованих правил нанесення штрихів на початку становлення цього способу, було отримане заплутане й неузгоджене штрихування, яке не передає пластичність рельєфу та його тривимірність. Також за такими картами неможливо отримати будь-яку корисну інформацію про рельєф, окрім напрямків схилів ділянок. Ось чому подальший розвиток цього способу вимагав рішучих дій систематизації усіх напрацювань, що пов'язано насамперед з військовою діяльністю, оскільки для ведення війни необхідні точні карти з детальними характеристиками рельєфу місцевості [19].

Вирішив це питання німецький військовий топограф Йоганн Георг Леман. У 1799 році ним було розроблено шкалу штрихування схилів, що була випробувана на різних топографічних картах і засвідчила дієвість нанесення штрихування за цією шкалою (рис. 1.2.1). Леман, як багато хто з його попередників, спирався на штрихи, що зображувалися вздовж напрямку схилу. Але це штрихування було розбите на декілька рівнів залежно від кута нахилу схилів. Для рівнинної місцевості штрихи були довгими, а для крутої – короткими. Відповідно до цього змінювалася й товщина штрихових ліній, що була пропорційною до кута нахилу схилу. Так, пологі схили промальовувалися довгими тонкими лініями, натомість круті – короткими та потовщеними штриховими лініями. За допомогою такого відображення рельєфу можна вільно зрозуміти, де знаходиться перехід між крутими то пологими схилами, а також можна визначити напрямок схилу. Широке поширення використання даної шкали почалося у XIX столітті й тривало майже до середини XX, але вже для естетичної складової, оскільки на зміну цьому способу прийшов спосіб горизонталей.

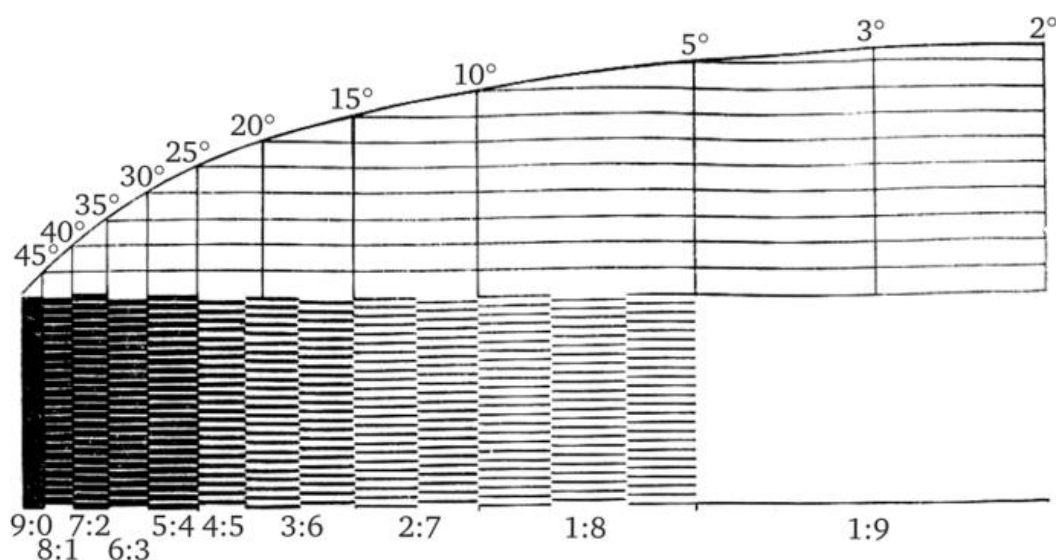


Рис. 1.2.1. Шкала штрихів Лемана [29]

Шкала Лемана всього має 9 ступенів, що враховуються через відношення товщини штрихової лінії на карті до проміжку між штрихами, тобто за такою пропорцією:

$$\frac{T}{C} = \frac{a}{(45^\circ - a)},$$

де T – товщина штриха,

C – проміжок між штрихами,

a – кут нахилу схилу.

У результаті виходить, що для схилів, які мають кут нахилу від 0° до 5° відношення товщини до проміжку між горизонталями становить $1 : 9$, для схилів з кутами нахилу від 5° до 10° – $1 : 8$, від 10° до 15° – це співвідношення вже сягає $2 : 7$. Тобто з поступовим збільшенням крутизни збільшується товщина штрихів і водночас зменшується проміжок між штрихами. Так, для схилів, які крутіші за 45° , співвідношення вже становить $9 : 0$, що означає відсутність проміжку між горизонталями і відповідно відображення їх суспільним чорним кольором. Ця шкала стала основою для створення серій топографічних карт по всій Європі, включаючи й Україну. Так були створені триверстові воєнно-топографічні карти Російської імперії Федором Шубертом та Павлом Тучковим (рис. 1.2.2). Протягом наступних ста років шкала Лемана була доповнена чи доопрацьована іншими вченими, але Йоганн Георг Леман зробив значне відкриття, заклав основу створення штрихових ліній.

Подальший розвиток способу штрихування полягає в додаванні додаткових елементів, так була додана умова освітлення схилів. У результаті схили на карті були показані тіньовим штрихуванням за умови бічного освітлення. Такий спосіб був розроблений наприкінці XVIII століття та розвивався протягом першої половини XIX. Активно використовувався у Франції, Швейцарії та частково Італії. При цьому штрихи виглядали таким чином, що освітлені схили гір промальовувалися дуже тонко, натомість затіненні схили зображувалися товстими штрихами. Власно цей ефект і створював тривимірний вигляд місцевості, що зображується на карті. Такий спосіб зображення рельєфу є досить ефективним при показі на карті гірських районів з великою кількістю долин та наявністю гострих вершин [65].

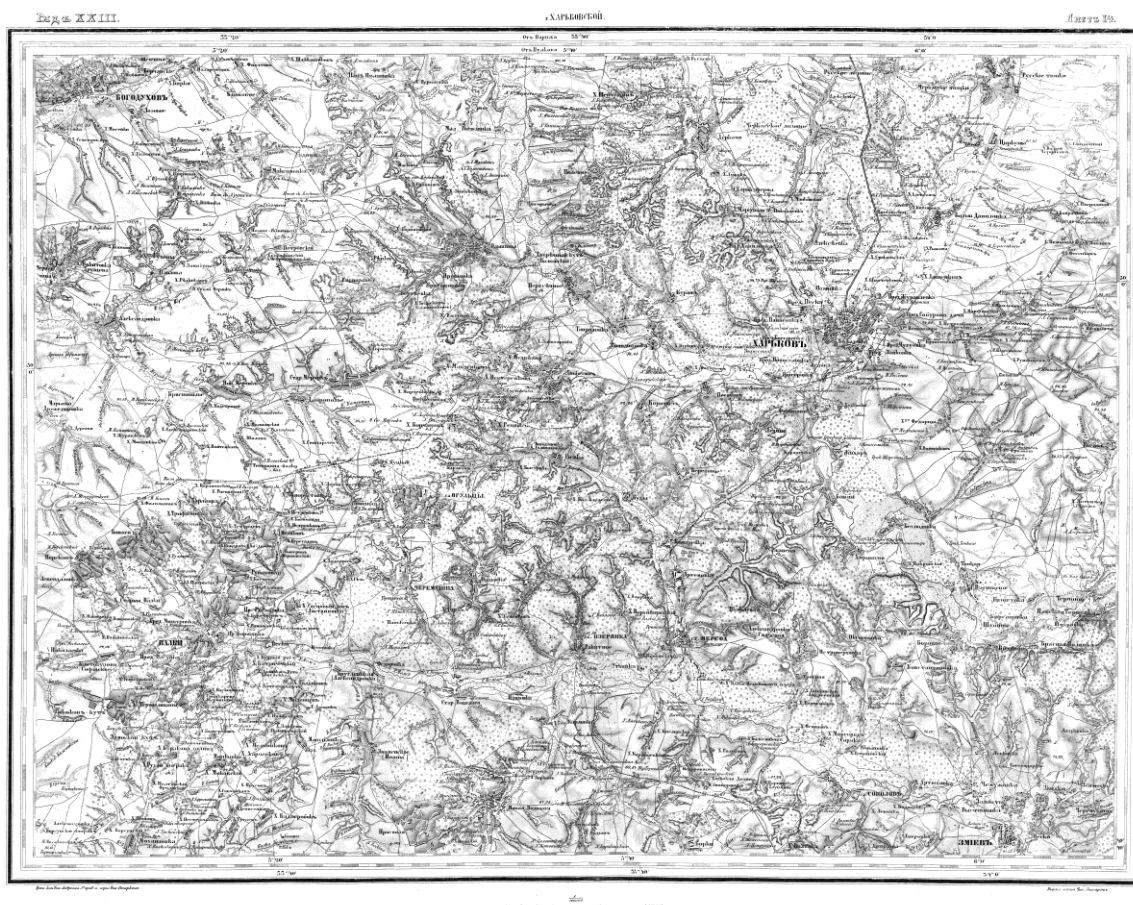


Рис. 1.2.2. Военно-топографічна карта Російської Імперії, території Харківської губернії. Ряд XXIII, лист 14. Робота Федора Шуберта та Павла Тучкова. Масштаб 1 : 126 000 (3 версти в одному дюймі). 1846 – 1863 pp. [30]

У другій половині ХХ століття спосіб штрихування був удосконалений швейцарським вченим Едуардом Імгофом. Ним було систематизовано відомості про спосіб штрихування і виокремлено 5 правил, за якими повинні бути побудовані штрихи. Так, штрихування має підпорядковуватися таким правилам:

- штрихи повинні йти вниз у напрямку найкрутішого схилу;
- штрихи мають розташовуватися горизонтальними рядами;
- довжина штрихів має відповідати висоті перерізу рельєфу, при цьому довжина штрихових ліній на найкрутішому схилі має бути не менше 0,2 мм;
- узгодження відношення між товщиною штрихів та відстанню між ними, щоб досягти ефекту затінення (крутий рельєф, значить більша густота схилів);

- щільність штрихування є однаковою на всій площі карти, штрихування має бути розташоване з рівним інтервалом, тобто цим правилом встановлюється кількість штрихів на сантиметр горизонтальної протяжності (одними з найбільш відомих прикладів є зображення рельєфу, коли на 1 см горизонталі розташовувалися 30 і більше штрихів, що є досить детальним відображенням).

Окрім цих правил Едуард Імгоф поєднав спосіб штрихування зі світлотіньовим відображенням рельєфу, що стало новим у техніці штрихування, в подальшому цей спосіб отримав назву «Швейцарський скельний стиль» [19].

Загалом спосіб штрихування, хоч і не передає основні геометричні характеристики форм рельєфу, але він є достатньо наочним, пластичним, можна чітко виокремити круті та похилі ділянки (рис. 1.2.3). Також потрібно сказати, що вражає детальність відображення, так, наприклад, на одному сантиметрі опорної горизонталі для промальовки можна нарахувати близько 30 штрихів. Ця цифра є вражаючою, враховуючи те, що рельєф відображувався переважно вручну. Що ж стосується недоліків, то надмірне штрихування може заважати відображенню на карті інших деталей місцевості, наприклад, важко відобразити дороги, річки, окремі точкові об'єкти.

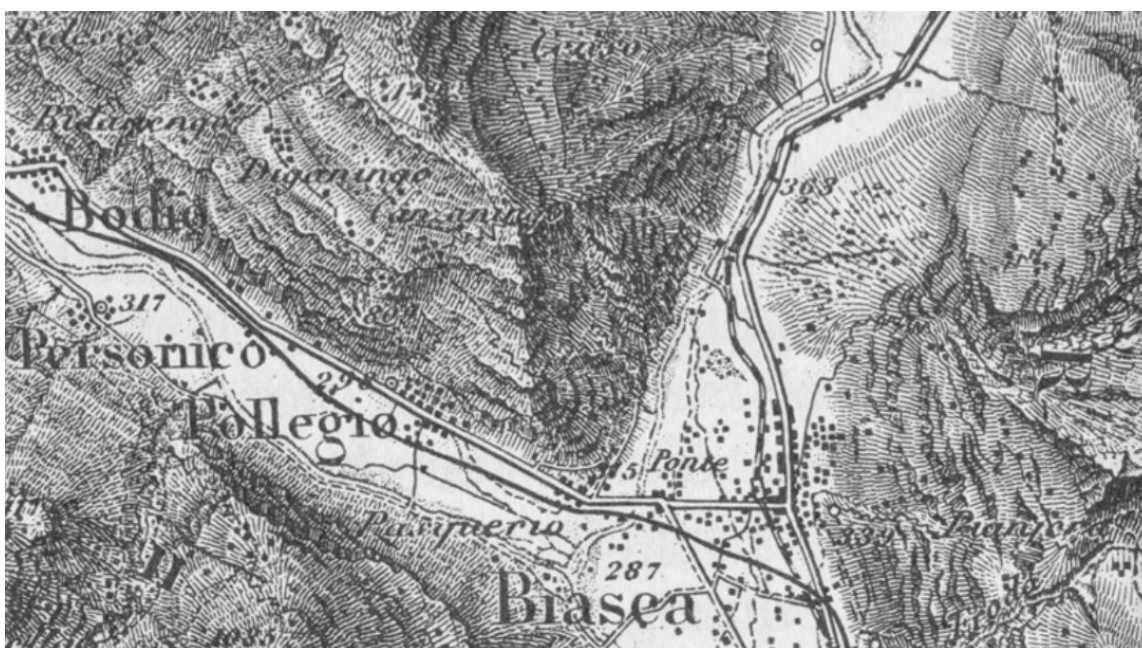


Рис. 1.2.3. Частина великомасштабної топографічної карти, виконана способом штрихування. Робота Гійома Анрі Дюфура. Масштаб 1 : 100 000. 1858 р. [46]

У той час коли у світі домінували карти створені методом штрихування, виникла нова графічна форма відображення рельєфу – горизонталі (ізогіпси). Їх попередником були ізобати, тобто лінії, що поєднують точки з однаковою глибиною. На сьогодні горизонталі стали незамінними інструментами в картографії й повністю витіснили спосіб штрихування.

Історія даного способу починається з того, що протягом довгого часу мореплавці потребували карт, які полегшують визначення мілководдя, тому на їх карти були нанесені цифри промірів глибин. Від таких карт із глибинними промірами до карт ізобат був дуже короткий крок, потрібно було просто поєднати сусідні точки однакової глибини. Таким чином ясність карт була підвищена через обмеження інформації лініями однакового розміру, кожна з яких представляє певну глибину.

Одне з найдавніших зображень ізобат, що було виявлено до нашого часу, є рукописна карта геодезиста Пітера Брюенса, датована 1584 роком, на якій зображено навігаційний канал для річки Спарне в Нідерландах (рис. 1.2.4). Ця карта є досить детальною для свого часу, оскільки показує лінію глибини 7 футів. Деякі дослідники не вважають її ізобатою, а рекомендованим маршрутом по річці Спарне, оскільки вона позначає водний шлях, за яким можна перетнути цей проміжок річки. Проте, на мою думку, дане відображення все ж вплинуло на розвиток картографування рельєфу, оскільки з'явилася нова форма відображення показника.

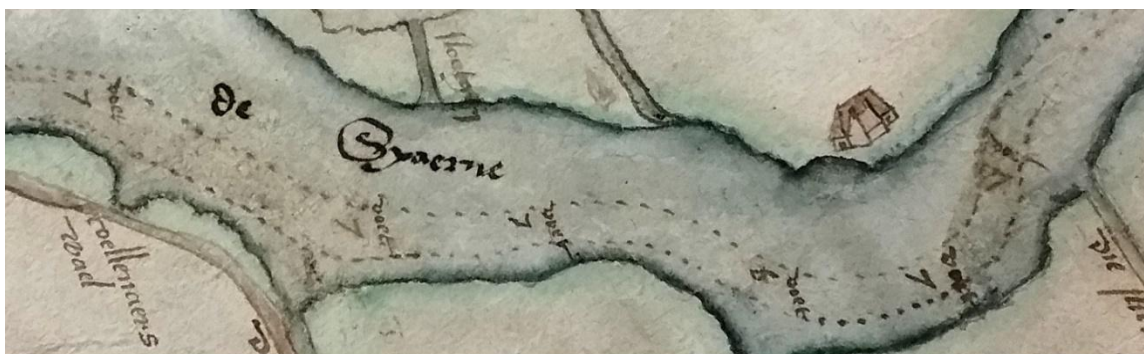


Рис. 1.2.4. Карта навігаційного каналу для річки Спарне в Нідерландах.

Робота Пітера Брюенса. 1584 р. [37]

Протягом наступних ста років невідомо чи були створені подібні карти з використанням ліній глибини, на сьогодні знайдено інформацію тільки про рукописні ізобатичні карти П'єра Анселена 1697 року, видані в Роттердамі, що показують річку Маас з ізобатами (рис. 1.2.5). Для кольорового представлення ізобат на даній карті використовуються кольорові чорнила. Прямими лініями подаються маршрути промірів глибин. Позначені також схеми триангуляції, окремо в плані нанесено будівлі. Метою створення даних карт було уникнення засипання піском каналів, тобто щоб влада в місті змогла вжити ефективних заходів протидії. У наш час невідомо як П'єр Анселін прийшов до розробки ізобат, оскільки жодного іншого геодезиста, який використовував їх до цього не виявлено, окрім карти Пітера Брюенса 1584 року, проте навряд чи Анселін знав, що за сто років до нього вже було створено прототип ізобат.



Рис. 1.2.5. Фрагмент ізобатичної карти річки Маас поблизу Роттердама.

Робота П'єра Анселіна. 1697 р. [37]

Подібні спроби побудови ізобат були зроблені у Франції, Італії, продовжували над цією темою працювати і в Нідерландах. У 1725 році італієць Луїджі де Марсільї, намагаючись поєднати між собою геологічну безперервність гірського ланцюга з особливостями морського дна публікував свою працю під назвою «Histoire physique de la mer», і до неї була додана карта «Carte du Golfe du Lion», що мала одну ізобату у вигляді уступу, намальовану від руки (а не серію ліній, що позначають зміни глибини). Хоча карти П'єра Анселена є старішими на 30 років за цю карту, малоймовірно, що Луїджі де Марсільї, який працював у Франції, знав про його роботу.

Невдовзі, а саме в 1730 році, з'явилася відома мідна карта ізобат нідерландського картографа Ніколаса Самуеля Крукіуса, що показує русло річки Мерведе (рис. 1.2.6). Можна з впевненістю сказати, що ця карта є справжнім шедевром, оскільки вперше в історії картографії була використана друкована система батиметричних контурів. Карта також відома своїм гарним гравіюванням. Початковою точкою для створення даної карти були лінії, що розташовані під прямим кутом до берега, вздовж яких визначали глибину у футах під час відпливу. На основі зібраних даних про глибину методом інтерполяції на карту було нанесено ізобати. Звичайно виникає думка, а чи справді Крукіус став першим, хто запровадив використання ізобат, оскільки він бачив досить детальні карти Анселіна, а також зустрічався з Марсілії. Проте все ж він був першим, хто сприяв їх широкому використанню, окрім того його карти були широко доступні всій Європі, тобто у свій час він зробив популяризацію даного способу. За його працями Філіп Буаш у 1737 році створив карту ізобат Ла-Манша [51].

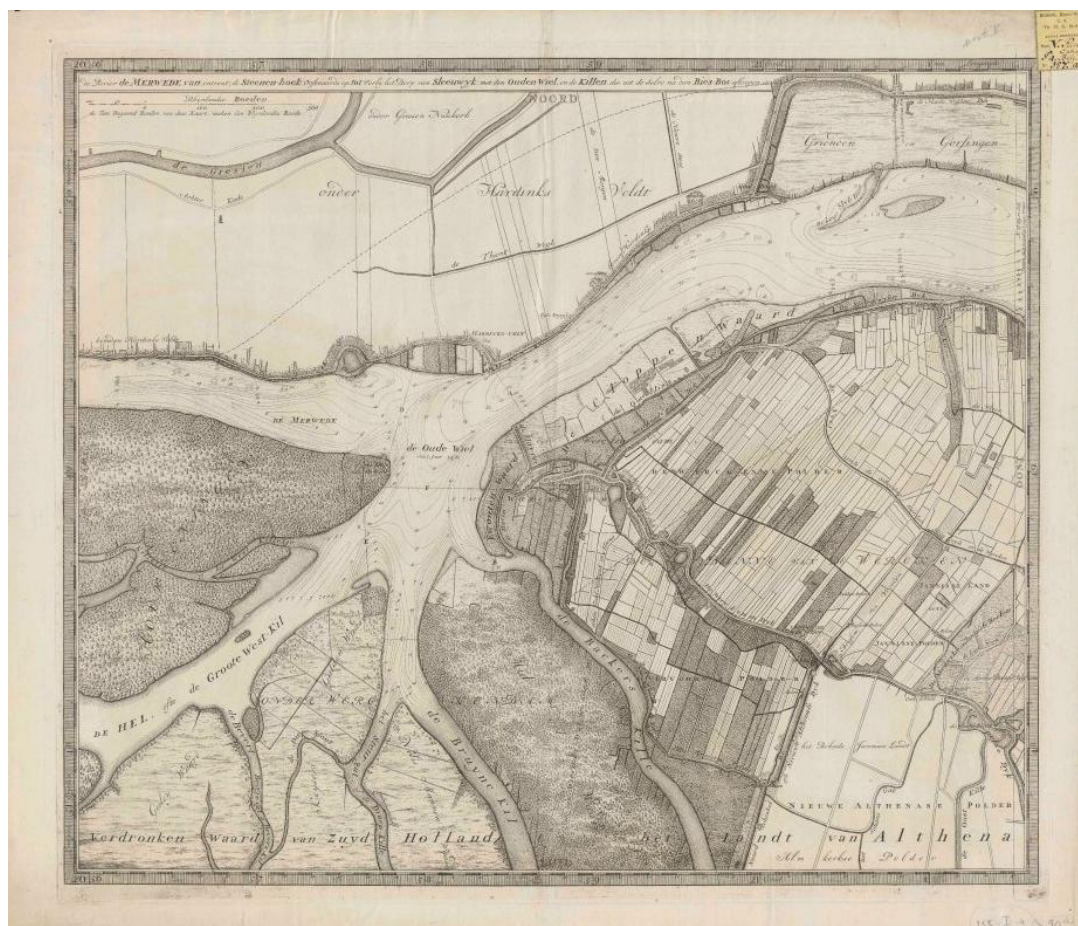


Рис. 1.2.6. Карта ізобат річки Мерведе в Нідерландах.

Робота Ніколаса Крукіуса. 1730 р. [51]

Тож розглянувши історію появи ізобат, можна перейти до того, як же відбувся перехід від ліній, що з'єднують точки з однаковою глибиною до тих, що знаходяться на суходолі, тобто до горизонталей або ізогіпс. Зараз здається, що цей перехід є достатньо очевидним, проте у XVIII столітті виникали певні труднощі, оскільки вчені не могли зрозуміти, як правильно використати методи вимірювання глибини для вимірювання висоти та існували менш вагомні причини для визначення й зображення висоти саме таким способом. Першими хто почав досліджувати «наземну версію ізобат» були французи у 1770 роках. Так, у 1771 році Марселлен дю Карла створив першу карту з використанням горизонталей у візуалізації рельєфу уявного півострова. Після вчений продовжив працювати над горизонталями і ним було створено декілька карт, і одна з них, що видана у 1782 році, має вже потовщені горизонталі (рис.1.2.7). І вже в 1791 році французький вчений Жан Дюпен-Тріель склав першу карту рельєфу Франції створену способом горизонталей (рис. 1.2.8).

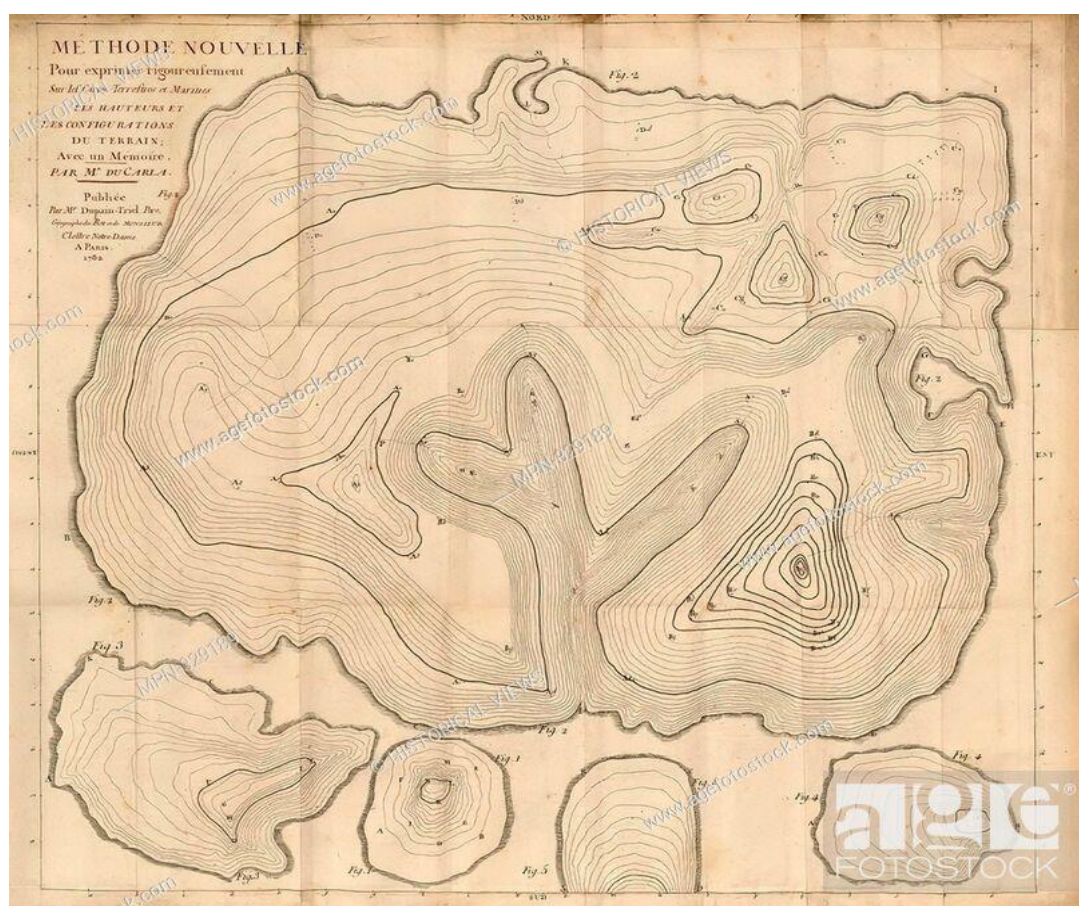


Рис. 1.2.7. Одна з перших топографічних карт з горизонталями.

Робота Марселлена дю Карла. 1782 р. [60]



Рис. 1.2.8. Перша карта рельєфу створена способом горизонталей.

Робота Жана Дюпена-Тріеля. 1791 р. [33]

Тобто спосіб ізоліній був вже відомий, поки метод штрихування знаходився в розробці та активному використанні. Проте він не ввійшов в загальне користування до того, поки топографічні вишукування не досягли достатнього прогресу, а відбулося це не раніше початку XIX століття. А вже починаючи з другої половини XIX століття використання цього способу стає основним для зображення рельєфу на загальногеографічних, гіпсометричних та багатьох інших картах різних масштабів.

Горизонталі відіграють ключову роль у створенні картографічного зображення рельєфу і є єдиним геометричним елементом, що визначає форму рельєфу. Загалом горизонталі – це лінії на карті, що відображають метричне розташування точок земної поверхні на одній висоті над рівнем моря. Форми

рельєфу можна уявити розрізаними горизонтальними площинами, що пересікають поверхню суходолу. Ці площини проєктуються на карту у вигляді ізогіпсів, спрощено зображуючи форми рельєфу (рис. 1.2.9).

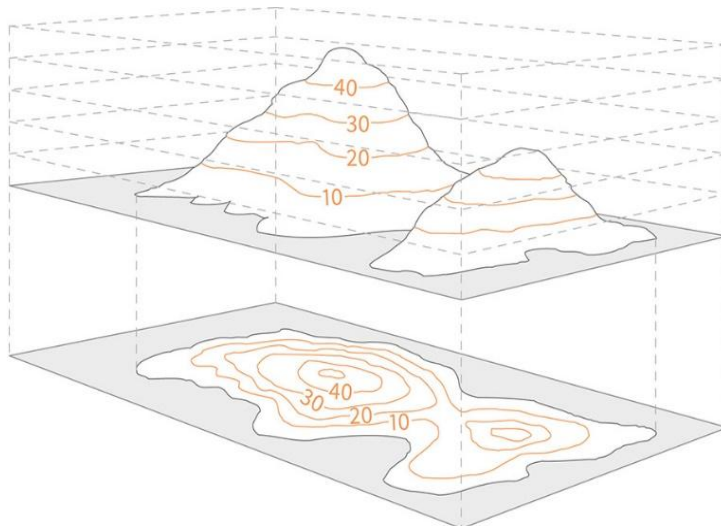


Рис. 1.2.9. Схема нанесення горизонталей на карту [34]

Ізогіпси надали можливість отримання детальних планово-висотних характеристик рельєфу у будь-якій точці карти. Гіпсометричні карти стали цінним ресурсом для морфометричного аналізу, статистичних розрахунків, а потім знайшли застосування у математичному моделюванні, у тому числі під час створення цифрових моделей рельєфу.

Спосіб горизонталей має виняткові переваги, що полягають у детальній передачі геометричних форм місцевості, висотних відміток, перепадів висот, напрямків схилів тощо. Проте це уявний спосіб, таких ліній в природі не існує, та й на карті читабельність цього способу не досить явна, оскільки не вистачає тривимірного зображення та його важко зрозуміти.

Часто з цього приводу у науковців виникали дискусії, наприклад, німецький картограф Пойкер в 1898 році довів, що при достатній шкалі закладення, подібно штрихуванню спосіб горизонталей задає затемнення та створення тривимірного зображення. Проте для того, щоб відображення рельєфу мало наочність, треба дотримуватися малої висоти перерізу рельєфу, а це не завжди доречно для тих же топографічних карт, де окрім рельєфу ще треба позначати населені пункти, гідрологічні об'єкти, рослинність тощо (рис. 1.2.10).



Рис. 1.2.10. Плани південно-східної частини Нової Гвінеї.

Створені у Великій Британії. 1926 р. [39]

На противагу цьому твердженню виступав Еккерт, який в одній зі своїх робіт 1921 року стверджував, що форма ізогіпс не відповідає пластиці, оскільки вони не повторюють напрямок схилу, а просто розбивають його на ступені. У результаті такої тривалої дискусії було підсумовано, що спосіб горизонталей має наочність і пластичність тільки за умови використання малої висоти перерізу рельєфу, правильної побудови малюнка ізогіпс з їх узгодженням, а також правильного відображення крутості, характеру профілю та ступеня пересіченості схилів і злиття на крутих схилах.

Саме через такі суперечки у початковий період після появи способу горизонталей, тобто у XVIII столітті, він був недостатньо оцінений в геодезії та у військових цілях. Противники даного способу висували аргумент, що перш ніж почати широке використання даного способу, необхідно тренуватися для

правильного читання рельєфу в горизонталях. Окрім цього відсутність ефективних інструментів для швидкого та точного визначення висот під час топографічного знімання було ще однією перешкодою. На початку XIX століття під час топографічного знімання горизонталі використовувалися лише як допоміжний елемент для креслення штрихів крутизни схилів. У цей час їх використання як самостійного способу обмежувалося лише планами великого масштабу, такі наприклад як 1 : 500, що найчастіше використовувалися у військово-інженерних роботах.

Уже в другій половині XIX століття горизонталі стали широко використовувати як самостійний спосіб зображення рельєфу, оскільки у топографічному зніманні з'явився кіпрегель, що дозволяв відносно легко визначати положення та висоту будь-якої кількості точок у процесі знімання.

Протягом XX століття картографи намагалися удосконалити спосіб горизонталей, наприклад, був розроблений спосіб освітлених ізогіпс, що часто називають іменем японського картографа Ісіро Танака. Він одним з перших відобразив вулканічний рельєф Японії способом освітлених ізогіпс (рис. 1.2.11), а також застосував цей метод для зображення дна Тихого океану. Є також способи ізогіпс різних кольорів й способи потовщення ізоліній, при такому способі горизонталі є тоншими на ділянках схилу, що зорієнтована до Сонця, і навпаки потовщені на протилежному схилі. Також було розроблено варіацію способу горизонталей на основі суміщення горизонталей в напівперспективну форму відображення рельєфу або морського дна на плановій основі [19].

Наприкінці XX століття спосіб горизонталей починає розвиватися більше в технологічному плані, оскільки йшла активна робота над геоінформаційними технологіями, що відкрили нові можливості для збору, обробки та аналізу геопросторової інформації. У XXI столітті процес створення горизонталей став повністю автоматизованим завдяки розвитку нових методів топографо-геодезичних робіт, дистанційного зондування, геоінформаційних систем тощо.

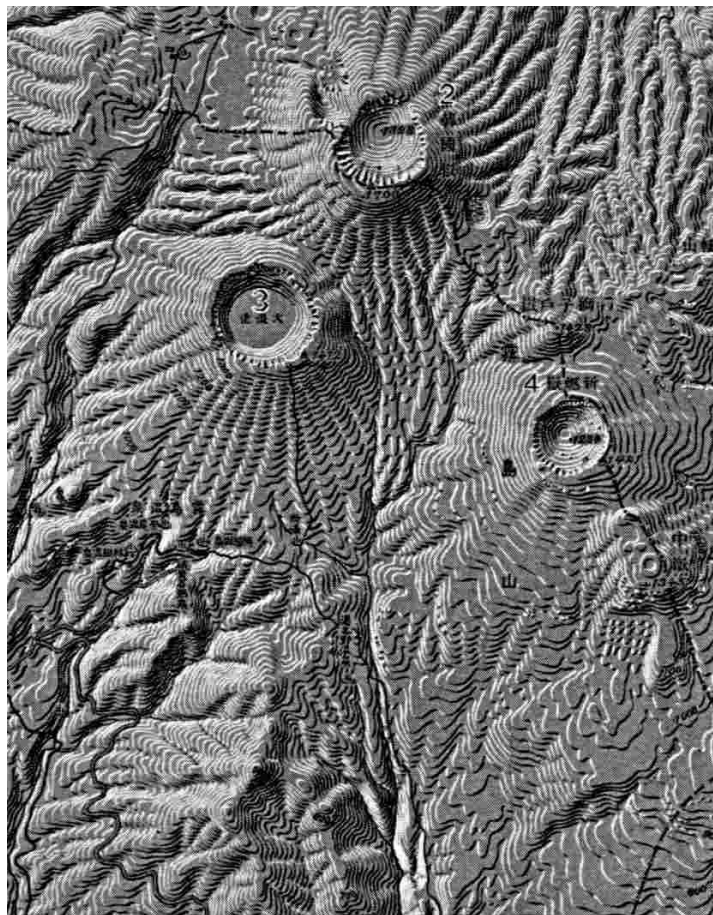


Рис. 1.2.11. Спосіб освітлених ізогіпс при картуванні вулканічного рельєфу Японії. Робота Ісіро Танаки. Масштаб 1 : 100 000. 1950 р. [36]

Розвиток способу горизонталей призвів до появи способу гіпсометричного зафарбування. Загалом даний спосіб полягає у зафарбуванні різними кольорами простору між ізолініями. Перша карта з використанням цього способу була створена в 1864 році в Австрії, проте на цій карті було важко відрізнити кольори, оскільки шкала була недостатньо контрастною й було важко побачити різні висотні зони. Але порівняно зі способом горизонталей цей є більш наочним, тому що зафарбування створює ефект глибини, можна чітко виокремити за кольором, які ділянки є вищими, які нижчими. Тобто головною перевагою гіпсометричного зафарбування є створення ефекту фону та розподілу гірських перепадів за висотою (рис. 1.2.12).



Рис. 1.2.12. Альпи. Масштаб 1 : 30 000 000. 1934 р. [52]

Ще одним способом, що прийшов для відображення рельєфу на планіметрично правильній основі, став спосіб світлотіньового зображення рельєфу. Його поява зумовлена винайденням у 1796 році Алоїзом Зенефельдером нової техніки друку, а саме літографії. Літографія швидко стала використовуватися для створення кольорових зображень, але в картографії вона почала використовуватися лише з середини XIX століття, що пов'язано з перебудовою технологічного процесу друку карт, адже до цього моменту вони друкувалися переважно однією фарбою. Окрім цього для друкування карт необхідно було, щоб в літографії збільшилася кількість кольорів й використовувався комбінований друк. Також необхідною умовою стало навчання картографів, оскільки передати пластику рельєфу тушуванням без навчання було доволі важко [19].

Завдяки літографії було полегшено процес створення різнокольорових карт, що в результаті ставали основою для кращого відображення штрихування, горизонталей. Потім літографія поступово почала витісняти спосіб штрихування, але в повній мірі, як горизонталям, це не вдалося зробити. Причиною цього є те, що світлотіньове зображення рельєфу, незважаючи на те, що є досить наочним, але не передає метричність. Саме через це штрихування використовувалася до ХХ століття, а світлотіньове зображення було допоміжним при відображенні інших способів. На багатьох картах ХІХ століття можна побачити поєднання різних способів зображення рельєфу. Досить часто картографи вдавалися до цього, щоб створити наочне й естетичне відображення рельєфу, що демонструє як пластичність, так і передає геометричні характеристики. Тому на картах можна побачити поєднання штрихових ліній, горизонталей зі світлотіньовим відображенням.

Світлотіньове відображення рельєфу можна було зустріти на рукописних картах ще до появи літографії, у ХVІІ столітті. Одним з найбільш відомих прикладів є карта кантону Цюриха 1667 року в масштабі 1 : 32 000 Ганса Конрада Гігера, що стала першою картою, на якій рельєф відображений у плані (рис. 1.2.13). Для виготовлення цієї карти картографу було потрібно близько 38 років, але його праця була неоціненна у свій час, тому що вона була засекреченою як військова таємниця. Використовуючи сучасні технології при накладенні цієї карти на сучасну електронну карту можна виявити виняткову точність. Тому спосіб світлотіньового відображення рельєфу з'явився на два століття раніше, але значного розвитку на подальше зображення рельєфу не мав.

Такий процес сповільнення розвитку способів зображення рельєфу можна помітити і у ХІХ столітті, оскільки більшість карт склалися військовими, карти були стандартизованими і відповідно перевага надавалася простому графічному відображенню, що сповільнило розвиток картографування.



Рис. 1.2.13. Кантон Цюриха. Робота Ганса Кондара Гігера.

Масштаб 1 : 32 000. 1667 р. [45]

Але водночас в деяких державах відбувався розквіт картографування, так, наприклад, у Швейцарії в XIX – XX століттях у зв'язку з потребами туристів та проблемами відображення рельєфу на картах, розвивалася тривимірна передача рельєфу через світлотіньову пластику. Багато для цього розвитку зробив Едуард Імгоф, що звернув увагу на повітряну перспективу і хотів відобразити її на карті в проекції зверху. Вищі вершини при цьому були більш контрастними, оскільки знаходилися ближче до глядача, натомість долини були менш контрастними, адже розташовані на відстані. Власне ці кольори і створювали тривимірне представлення рельєфу.

У 1965 році Едуардом Імгофом було опубліковано карту кантону Граубюндена, що стала першим масштабним прикладом використання техніки світлотіньового зображення рельєфу (рис. 1.2.14). Ця карта була виконана аерографом – приладом, що дозволяв розпилювати фарбу, тим самим пришвидшуючи процес відмивки рельєфу. Також цей прилад забезпечував плавні переходи між формами рельєфу. Але це дуже довгий процес, що одночасно вимагав особливих навичок для відображення рельєфу, тільки деякі картографи змогли опанувати цю техніку та створювати карти таким приладом. Наприкінці ХХ століття, завдяки розвитку геоінформаційних систем та дистанційного зондування Землі, створення карт способом світлотіньової пластики значно полегшилося, ми можемо буквально за декілька хвилин завантажити необхідну цифрову модель рельєфу та зробити її відмику.



Рис. 1.2.14. Фрагмент карти кантону Граубюндена з оформленням рельєфу способом світлотіньового зображення при косому північно-західному освітленні.

Робота Едуарда Імгофа. Масштаб 1:250 000. 1965 р. [56]

Таким чином, у XVIII – XIX століттях зародилася велика кількість способів зображення рельєфу, які розвиваються й на сьогоднішній момент. Саме ці способи зображення рельєфу, окрім штрихування, активно використовуються на картах для вирішення практичних завдань або наукових досліджень, оскільки їх головна перевага полягає у точності та достатньо швидкій побудові в геоінформаційному картографуванні.

1.3. Інноваційні підходи до зображення рельєфу у XX столітті

Зі значним розвитком науки і техніки у XX столітті в картографії з'являються нові способи зображення рельєфу. Наприклад, з широким поширенням фотографування в середині минулого століття, з'явився такий спосіб зображення рельєфу як фоторельєф. Цей спосіб представляє собою зображення рельєфу, що створено за допомогою фотографування рельєфної моделі. На жаль, цей метод був швидко забутий, що пов'язано насамперед з важкістю виготовлення рельєфної моделі та з тим, що при фотографуванні цієї моделі йшла втрата якості, оскільки зображення було представлено растровим комітками, які розкладали його на пікселі, при цьому втрачаючи якість.

Також є ще один спосіб, що засновується на використанні фотографій, а саме знімків аеро- чи космозйомки, та їх інтеграцією з картами. У результаті отримується карта рельєфу, що показує природні особливості місцевості. Зараз такий спосіб застосовується часто у відображенні на карті певних лінійних або точкових об'єктів, коли багато вільних місць на карті і треба заповнити простір, можна використати цифрову модель рельєфу, змінити її контрастність та вона стане гарною основою для отриманої карти.

Досить цікавим способом представлення рельєфу на карті, що з'явився у XX столітті, є стереоскопічний, що заснований на особливостях бінокулярного людського зору, тобто фізіології людини. У результаті здавалося б на звичайній двовимірній карті, рельєф на якій представлений червоним та синім кольорами,

через скельця різного кольору, ми можемо побачити тривимірний вигляд рельєфу (рис. 1.3.1). Цей спосіб зміг вирішити головну проблему відображення рельєфу на карті – передачу тривимірності на площині [65].

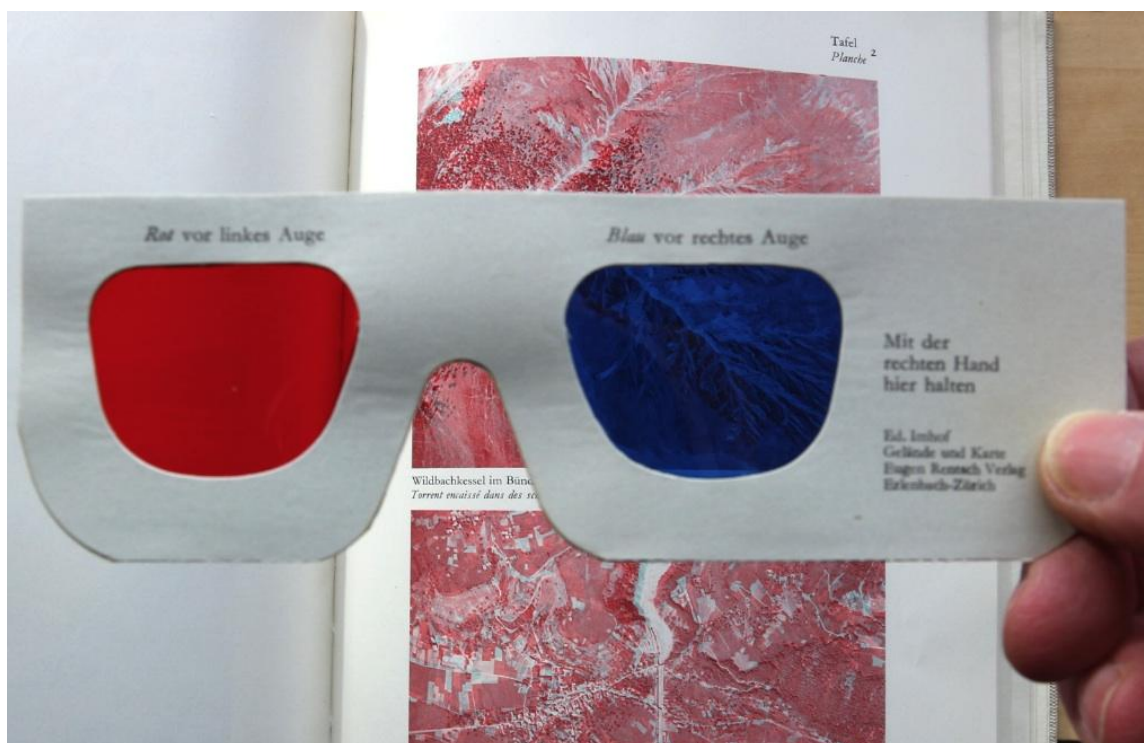


Рис. 1.3.1. Стереоскопічне зображення рельєфу [65]

Також зацікавлює своєю детальною роботою спосіб рельєфних моделей. Моделі рельєфу виготовлялися з різних матеріалів, а саме картон, фанера, гіпс та інші. Найвідомішими прикладами даного способу зображення рельєфу є гіпсові моделі гір Бітшхорн та Гроса Віндегелле створені Едуардом Імгофом в 1939 році (рис. 1.3.2). Для цього проєкту було проведено масштабне знімання місцевості, що включало велику кількість фотографій та високоякісних аерофотознімків. Як джерела інформації були використані власні нароби Едуарда Імгофа: геологічні профілі, креслення, карти, фотографії. Ці моделі вражають своєю детальністю. При побудові даних моделей рельєфу було встановлено відношення між горизонтальним та вертикальним масштабом, а саме що для високогірного це співвідношення становить від 1/2 до 1/5, для рівнинного – від 1/5 до 1/10. Створення рельєфних моделей заклало основу розвитку 3D-моделювання

рельєфу, але вже в геоінформаційному картографуванні, оскільки були визначені основні правила побудови моделей рельєфу.

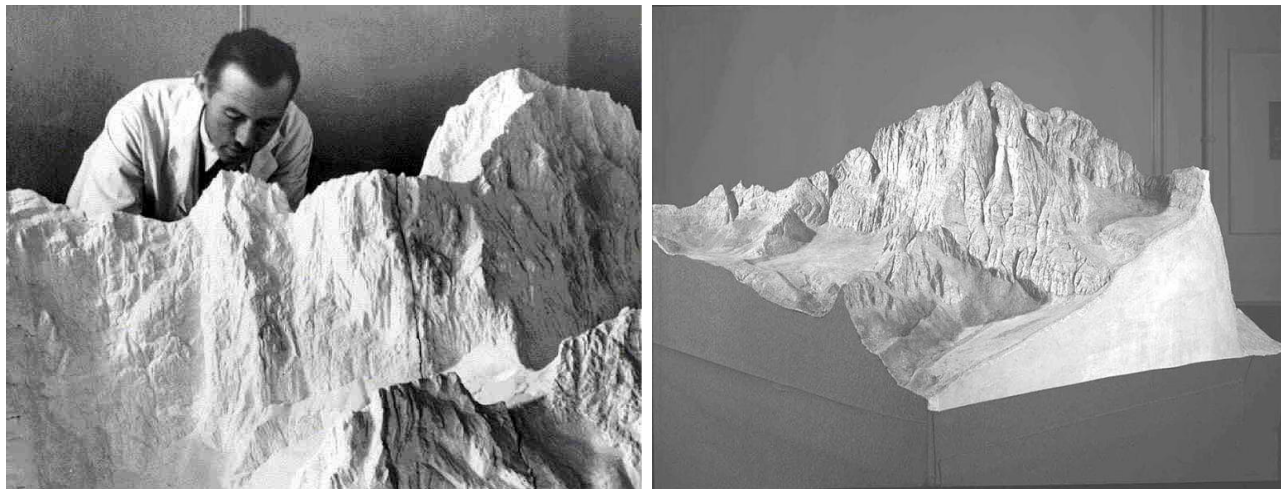


Рис. 1.3.2. Процес створення гіпсової рельєфної моделі гори Гросе Віндгелле (зліва), рельєфна модель місцевості (справа).

Робота Едуарда Імгофа.1939 р. [42]

Тобто протягом ХХ століття розвивалися різні цікаві за своєю суттю способи зображення рельєфу, але все ж найголовнішою подією став перехід на новий етап розвитку від традиційних ручних до автоматизованих цифрових систем, що вплинули на розвиток картографування. Також важливе значення для візуалізації рельєфу мав запуск перших супутників для спостереження за Землею, тобто розвитку дистанційного зондування, що надає дані про рельєф високої роздільної здатності.

Тож загалом ХХ століття було наповнено різними інноваційними підходами до зображення рельєфу, що пов'язано з технологічним розвитком. Але особливу увагу хотілося приділити саме розвитку геоінформаційних технологій, поява яких заклала подальший розвиток відображення рельєфу вже в геоінформаційному картографуванні, що буде описаний у наступному розділі.

РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ ВІДОБРАЖЕННІ РЕЛЬЄФУ

Застосування геоінформаційних технологій зробило революцію в різних галузях дослідження, включаючи географію, картографію та науки про Землю. Особливо важливою сферою, де ці технології мали глибокий вплив, є картографування рельєфу. Завдяки поєднанню географічних даних, супутникових зображень і передових комп'ютерних алгоритмів, геоінформаційні технології сприяють створенню точних і детальних карт рельєфу, дозволяючи дослідникам краще зрозуміти поверхню Землі та її особливості.

Протягом історії застосування геоінформаційних технологій при відображенні рельєфу значно розвинулося, завдяки прогресу технологій і зростаючій потребі у комплексному просторовому аналізі. Від ранніх ручних до сучасних цифрових методів дослідники постійно шукали способи відобразити характеристики та особливості місцевості більш точним і візуально привабливим способом. Розробка та інтеграція географічних інформаційних систем (ГІС), дистанційного зондування та комп'ютерної картографії відіграли важливу роль у цьому розвитку.

Цей розділ спрямований на вивчення історії застосування геоінформаційних технологій у картографуванні рельєфу, надання уявлення про ключові віхи, методології та виклики, з якими стикалися дослідники з часом.

2.1. Історія застосування геоінформаційних технологій при відображенні рельєфу

До появи комп'ютерів картографування було паперовим, що мало ряд незручностей порівняно з геоінформаційним картографуванням. Так, у паперовому картографуванні досить важко точно визначити площі об'єктів, це ж стосується й довжини. Будь-які обрахунки за паперовою картою були дуже

довгими, від дослідника вимагалася максимальна скурпульозність, щоб все досить точно виміряти і отримати результат, що буде відповідати реальній місцевості. Також в паперовому картографуванні однією з найбільших проблем було накладення різних шарів один на одного, для цього використовувалися декілька прозорих шарів, на яких зображувався тільки один об'єкт. Саме такі проблеми стали стимулом для переходу від паперового картографування до комп'ютерного, завдяки якому можна значно пришвидшити процес роботи з шарами, обчислювати площі об'єктів, довжини всього за декілька хвилин [63].

Що ж стосується відображення рельєфу на картах у ХХ столітті до появи комп'ютерів, то головним інструментом для роботи залишалися аналогові методи. Також в першій половині минулого століття отримали розвиток аерофотозйомка та фотограмметрія, що мали велике значення для подальшого розвитку картографування рельєфу саме в геоінформаційних системах. Це пов'язано з тим, що з появою геоінформаційних систем почалася їх інтеграція з даними аерофотозйомки, фотограмметрією.

Загалом ГІС – це система, що призначена для збору, відображення, обробки та аналізу поширення інформації про просторово розподілені об'єкти і явища. Застосування геоінформаційних технологій у комп'ютерному вигляді, до якого ми звикли і зараз він не є для нас чимось незвичним, почалося в 1960 роках з появою перших комп'ютерів та зародженням обчислювальної картографії. Цей період в історії ГІС отримав назву піонерський, коли напрацьовувався перший експериментальний досвід роботи з ГІС, досліджувалися їх можливості, починали створюватися перші великі проєкти. У 1963 році Роджер Томлінсон створив першу у світі комп'ютеризовану географічну інформаційну систему – Канадську географічну інформаційну систему (Canadian Geographic Information System або CGIS). Це стало ключовим моментом у подальшому розвитку ГІС, оскільки поклало основу комп'ютеризованого аналізу й зберігання даних. У Канадській ГІС зберігалася інформація про природні ресурси провінцій. Її унікальністю став багат шаровий підхід до обробки карт [62; 47].

У час становлення геоінформаційних систем вони не розглядалися для відображення рельєфу, тому що основна увага приділялася вдосконаленню географічної та графічної підготовки картографів, що будуть займатися створенням карт рельєфу. Саме це вважалося ключем до подальшого прогресу. Головною причиною такого судження була ще не повністю усвідомлена роль ГІС для картографування рельєфу. У деякому сенсі автоматизація процесу укладання карти віталася, але часто в це просто не вірили, оскільки вважали, що графічну структуру карти, її вимогливе зображення ніколи не зможуть відтворити машини. Вважалося, що на відміну від людини, комп'ютери не мають географічного судження та графічно естетичної чутливості, а тому вони не можуть створювати карти. Тож у час становлення геоінформаційних систем більшість картографів не вірили, що у майбутньому можна буде займатися відображенням рельєфу в комп'ютерах [19].

У піонерському періоді Говардом Фішером у 1964 році також було створено одну з найперших комп'ютерних картографічних програм, що отримала назву SYMAP. Ця програма здатна виводити карти за допомогою лінійного принтера і саме з нею були проведені одні з найперших досліджень у галузі комп'ютерної картографії та розроблено методи зображення рельєфу на картах. Також Говард Фішер у 1965 році створив Гарвардську лабораторію комп'ютерної графіки, що випустила два важливих проєкти GRID та Odyssey. Карл Стейніц та Девід Сінтон створили GRID, Деніс Вайт та Нік Крісман – Odyssey [43].

GRID представляла собою інноваційну геоінформаційну систему, що працювала з растрами. Це було новаторським підходом у порівнянні з попереднім програмним забезпеченням, що використовувало геометричні фігури для представлення об'єктів. Такий спосіб візуалізації інформації по комірках значно спростив представлення даних, що у свою чергу сприяло пришвидшеній обробці й аналізу інформації. Цим самим GRID запропонувала ефективний спосіб для відображення рельєфу на картах, а це було надзвичайно важливо для того часу, оскільки у відображення рельєфу комп'ютером просто не вірили.

Проект Odyssey також мав значний вплив на відображення рельєфу, завдяки своїм розширеним можливостями управління геопросторовими даними, що є типовим для сучасних геоінформаційних систем, для баз геоданих. Odyssey надавала користувачам більше інструментів для аналізу території та візуалізації даних, що робило її гнучкою й потужною системою.

Програмне забезпечення SYMAP, GRID, Odyssey стало революційним на свій час, тому що заклало основу для подальшого розвитку геоінформаційних систем. Їхні фундаментальні концепції значно розширили можливості комп'ютерного картографування, виходячи далеко за межі картографування рельєфу. Ці новаторські проекти стали основою сучасних ГІС, що на сьогодні використовуються у всьому світі для вирішення широкого спектра задач.

Наступним періодом у розвитку ГІС є період державних ініціатив, коли держава почала підтримувати розвиток геоінформаційних систем, розвивалися великі проекти. У цю епоху, а саме в 1969 році, Джеком Денджермондом і його дружиною Лаурою було створено Environmental Systems Research Institute або як його скорочено називають ESRI. Перші продукти від ESRI, наприклад, ARC/INFO, надавали інструменти для відображення рельєфу за допомогою його відмивки та затінення. Так, стаття Джеффри Найберта 1995 року показує методи створення точних моделей рельєфу у цьому програмному забезпеченні. Основна увага у цій статті приділяється покращенню картографічного відображення рельєфу в геоінформаційних системах через застосування цифрової моделі рельєфу. Для створення такого картографічного зображення необхідно зробити відмивку рельєфу, а потім на неї покласти напівпрозору класифіковану за висотами кольорову цифрову модель рельєфу, що створить тривимірний вигляд, підкреслить усі особливості поверхні (рис. 2.1.1). Ця робота показала, як можна отримати достатньо детальне відображення рельєфу через геоінформаційні системи [24].

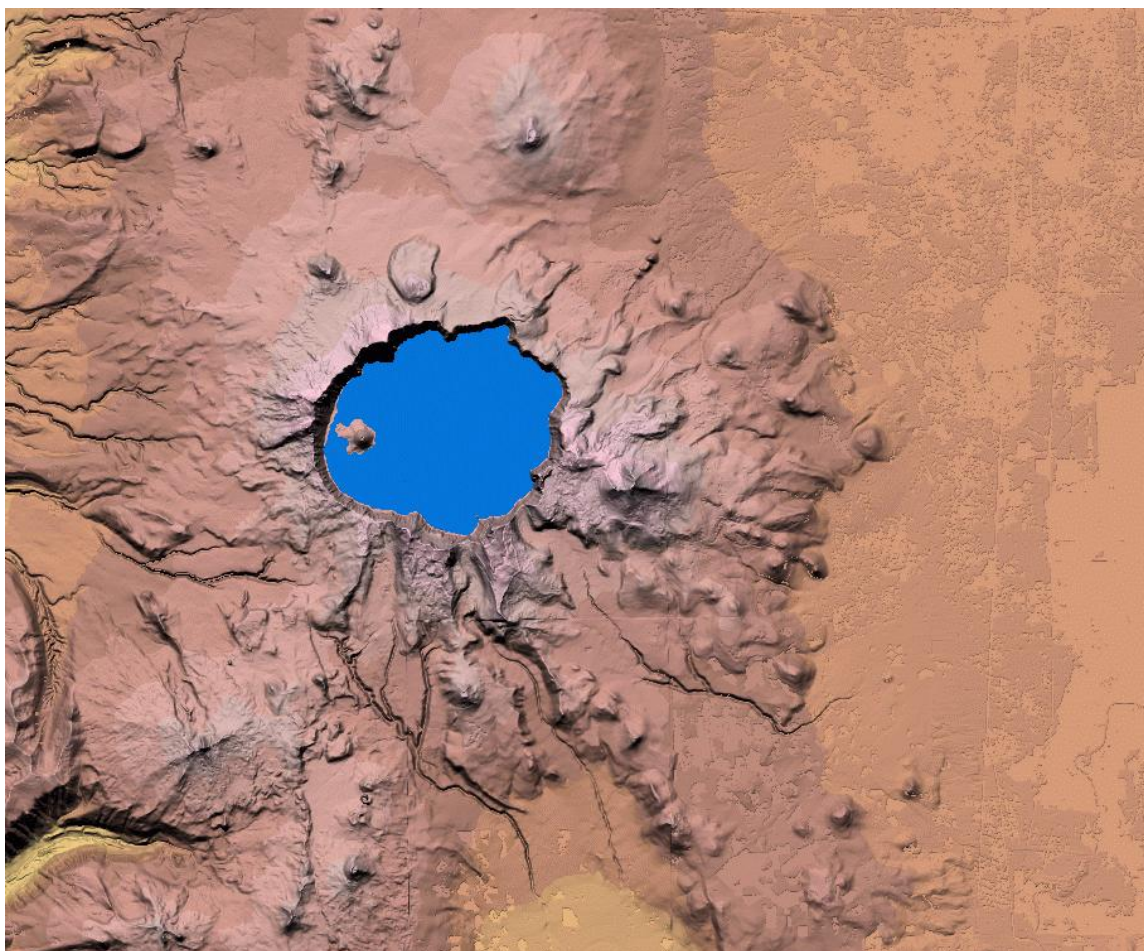


Рис. 2.1.1. Карта рельєфу озера Крейтер, штат Орегон.

Робота Джеффри Найберта. 1995 р. [24]

Уже на цьому етапі можна побачити інтеграцію геоінформаційних систем та даних дистанційного зондування, що особливо стає важливою у період комерційного розвитку. Існуючі на той час геоінформаційні системи відкрили нові можливості, уряди країн усвідомили важливість й переваги геоінформаційного картографування над традиційним, тому почалася комерціалізація програмного забезпечення. Наприкінці 1970 років розвинувся широкий ринок програмного забезпечення, наприклад, GRID, SURFACE, GOEMAP, MAP, IMGRID, а в кінці 1980 років він став ще більшим [63]. У 1981 році ESRI було розроблено перше комерційне програмне забезпечення – ARC/INFO, про яке згадувалося раніше. Цей розвиток геоінформаційних систем разом з розвитком дистанційного зондування сприяв все більшому удосконаленню програмного забезпечення. Одним з напрямків покращення було

саме картографування рельєфу, збільшення його деталізації. Наприкінці ХХ століття програмне забезпечення вже було оснащено спеціальними інструментами й функціями для відображення рельєфу. Однією з провідних платформ у цій сфері стала ArcGIS від ESRI, у функціонал якої були додані модулі 3D Analyst і Spatial Analyst, що дозволяють проводити детальну візуалізацію й аналіз рельєфу (рис. 2.1.2).

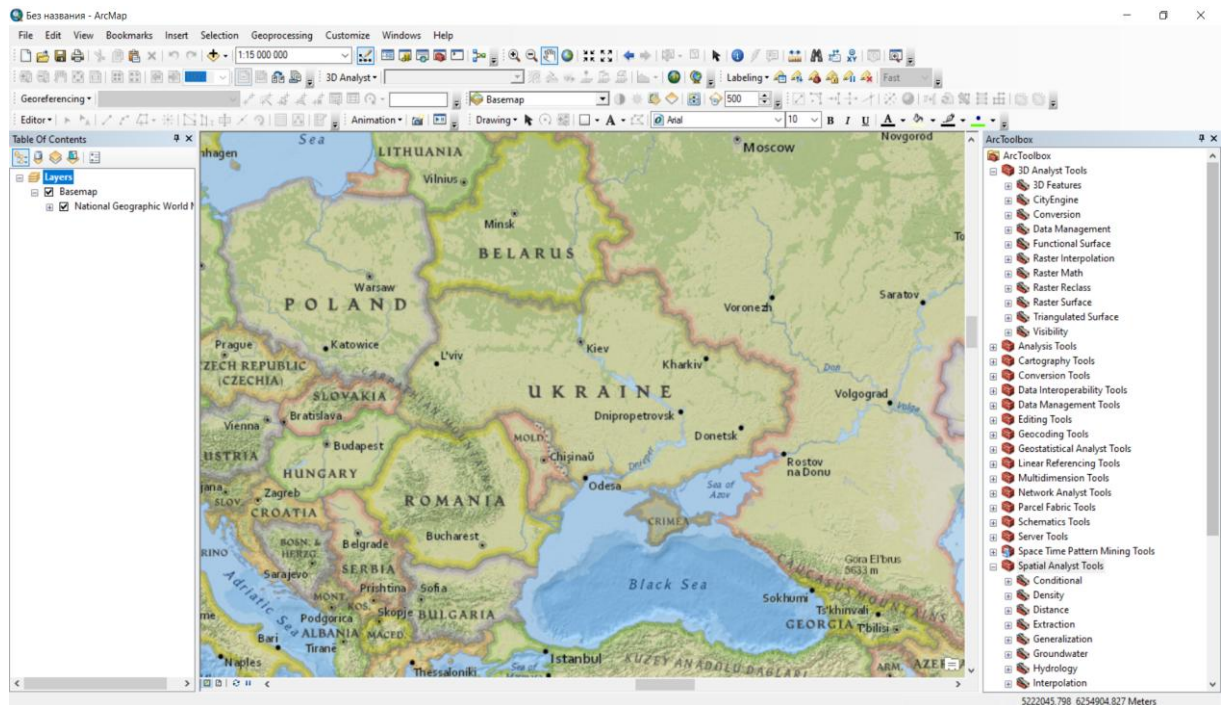


Рис. 2.1.2. Два найважливіші інструменти в ArcGIS
3D Analyst і Spatial Analyst

У 1990 роках минулого століття геоінформаційні системи стають масовими, тому що комп'ютери ставали дешевшими, програмне забезпечення розвивалося, з'являлася більша кількість відкритих оцифрованих даних. Відповідно йшов подальший розвиток автоматизації способів зображення рельєфу в геоінформаційних системах, оскільки рельєф є одним з найголовніших елементів у створенні карт, а користувачів стає більше. Картографи використовували цифрові моделі рельєфу, щоб більш точно відобразити земну поверхню, при цьому використовуючи різні способи зображення рельєфу (світлотіньової пластики, горизонталей, гіпсометричного зафарбування тощо) [62].

Також важливою деталлю стало те, що програмне забезпечення вже могло обробляти як векторні, так і растрові дані. Але майже все програмне забезпечення було комерційним. Лише на початку XXI століття з'являються геоінформаційні системи з відкритим кодом, одна з найбільш відомих – QGIS, що за своїм функціоналом майже не відстає від ArcGIS. Окрім цього з'являється все більше даних відкритого доступу, станом на 2024 рік можна вільно завантажити цифрові моделі рельєфу, супутникові знімки, навіть деякі дані LiDAR є доступними. Велике значення для картографування рельєфу також мають онлайн-сховища, які зберігають великі обсяги геопросторових даних.

Загалом історія геоінформаційних технологій у картографуванні рельєфу демонструє безперервну еволюцію, що спричинена прогресом комп'ютерних технологій, методів збору даних і можливостей програмного забезпечення. Застосування геоінформаційних систем при візуалізації рельєфу, значно покращило наше розуміння земної поверхні.

2.2. Сучасне застосування геоінформаційних технологій при створенні карт рельєфу й майбутні перспективи

Станом на 2024 рік геоінформаційні технології використовують усі, оскільки ми живемо в інформаційному суспільстві. Такі звичайні речі, що стали вже буденністю: визначення місцеположення на смартфоні, використання навігаційних програм. Усе це базується на геоінформаційних системах. Геоінформаційні технології зробили революцію і в картографуванні рельєфу. На сьогодні вони дозволяють створювати достатньо детальне та точне відображення рельєфу. Ці технології поєднують між собою геоінформаційні системи, дистанційне зондування, що разом змінюють спосіб візуалізації та розуміння рельєфу і допомагають у різних сферах нашого життя.

Геоінформаційні системи є основним інструментом у геоінформаційних технологіях, що власне і створюють відображення рельєфу на картах. ГІС

дозволяють збирати, обробляти, аналізувати й відображати просторові дані. Сучасне програмне забезпечення, наприклад, таке як ArcGIS Pro, ArcGIS for Desktop, QGIS, надає нам широкий інструментарій для зображення рельєфу на картах. Більшість способів зображення рельєфу, що були в традиційному картографуванні зараз є автоматизованими саме в цих програмах. За однією цифровою моделлю рельєфу можна створити горизонталі, використати спосіб світлотіньової пластики або спосіб гіпсометричного зафарбування. Окрім того, що все це створюється автоматично, це займає достатньо мало часу, порівняно з традиційним картографуванням, що було переважно ручним, і для створення однієї карти потрібно було багато часу. Зараз же залежно від даних, що отримані або з ортофотоплану, а саме його точок, які містять дані про висоту, або через цифрову модель рельєфу, можна зробити карту, що буде достатньо точною.

Окрім цього сучасні геоінформаційні системи, наприклад, платформи ArcGIS та QGIS, підтримують 3D-моделювання, що покращує візуалізацію особливостей рельєфу і вирішує основну складність у його картографуванні – передачу тривимірності. Створення 3D-моделі у геоінформаційних системах з використанням цифрової моделі рельєфу виконується достатньо швидко, потрібно лише вказати вертикальний масштаб і ми можемо побачити готову 3D-модель, що може допомогти у моніторингу стихійних лих, міському плануванні тощо.

Серед геоінформаційних технологій, що вплинули на картографування рельєфу, знаходяться й технології дистанційного зондування, що навіть порівняно з ХХ століттям, значно розвинулися, оскільки збільшується їх роздільна здатність. Супутникові зображення високої роздільної здатності, застосування даних LiDAR (Light Detection and Ranging), використання БПЛА (безпілотних літальних апаратів) – усе це вплинуло на збільшення детальності картографування рельєфу.

Безпілотні літальні апарати кардинально змінили топографічне знімання, включаючи й картографування рельєфу, оскільки мають ряд переваг над іншими

методами. БПЛА, оснащені вдосконаленими камерами, пропонують безліч переваг, що значно підвищують ефективність й точність топографічного знімання, оскільки надають детальні дані досліджуваної території. Основна перевага використання БПЛА в топографічному зніманні полягає в швидкому зборі даних, ефективно охоплюючи досліджувану територію. А це не тільки скорочує час, але й мінімізує витрати порівняно з традиційними методами наземного знімання. Економічна ефективність є ще однією помітною перевагою, оскільки традиційні методи топографічного знімання часто потребують значних робочих сил, часу, ресурсів, а БПЛА значно оптимізують цей процес, зменшуючи потребу у кількості геодезистів та мінімізуючи час знімання. Безпілотні літальні апарати надають можливість отримувати достатньо точні висотні дані.

Що ж стосується використання супутникових знімків для отримання висотних даних, можна сказати, що точність та збереження часу є головними перевагами даного методу, проте істотними недоліками використання супутникових зображень є їх просторова роздільна здатність, відсутність своєчасних даних і вартість. Досить часто вони є коштовними, особливо з використанням даних LiDAR. Дані LiDAR є однією з найдетальніших хмар точок, проте вони є найдорожчими у світі. Тому зараз активно у професійній сфері все частіше для отримання абсолютних висот території використовуються БПЛА, що поступово замінюють й космічні методи, оскільки є дешевшими та пропонують детальні й точні вимірювання висоти, що можуть бути використані для створення топографічних карт, цифрових моделей рельєфу, горизонталей тощо [53; 64].

Цифрові моделі рельєфу є дуже важливими для відображення рельєфу на карті. Вони представляють земну поверхню в цифровому форматі, де кожне значення пікселя відповідає певній висоті. Цифрові моделі рельєфу отримуються з даних дистанційного зондування, наземного знімання території. У вільному доступі є цифрові моделі рельєфу Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) та Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). Вони

надають достатньо точні висотні дані, що мають важливе значення для картографування рельєфу.

Щоб показати сучасний стан розвитку геоінформаційних технологій та їх переваги над традиційним картографуванням, було створено карту рельєфу Харківської області, що включає інформацію про рельєф, експозицію схилів та моделі річкового стоку (рис. 2.2.1). Вибір цих параметрів пов'язаний з їх широким використанням у процесі обробки геопросторових даних.

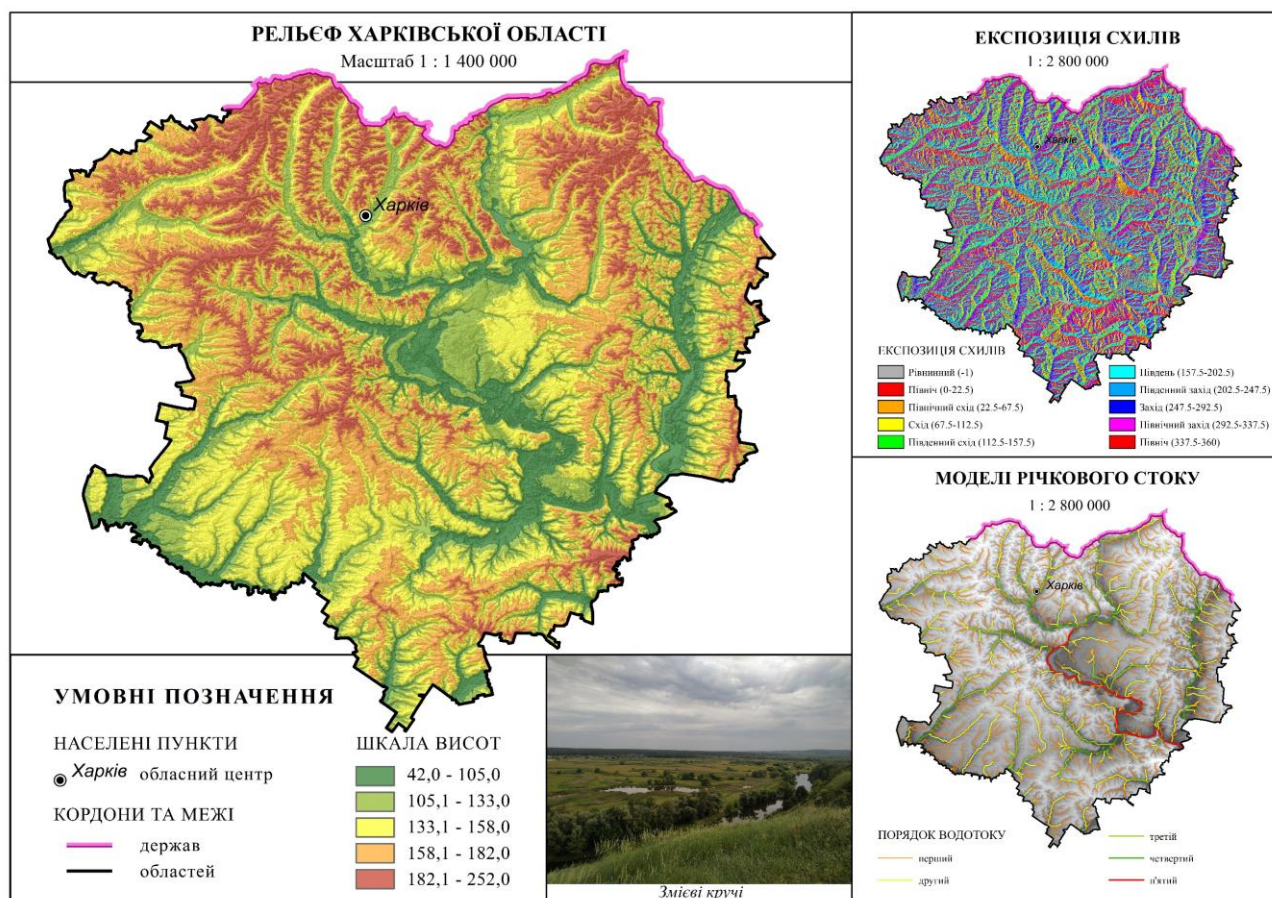


Рис. 2.2.1. Рельєф Харківської області

Для створення карти рельєфу Харківської області було використано спеціалізоване програмне забезпечення ArcGIS Desktop версії 10.8 американської компанії ESRI. За допомогою ArcMap та його інструментів, наприклад, таких як Spatial Analyst і 3D Analyst, можна виконувати візуалізацію рельєфу, створювати ЦМР, профілі, визначати кути нахилу схилів тощо.

Першим етапом у створенні карти стала обробка двох завантажених цифрових моделей рельєфу SRTM, а саме було проведено їх об'єднання в

безшовну мозаїку та обрізання за векторним шаром досліджуваної території, меж Харківської області [58]. Також можна провести додаткове згладжування ЦМР, інструментом Fill для заповнення локальних знижень. Далі переходимо до створення основної карти.

Для створення основної карти рельєфу Харківської області з інструментів Spatial Analyst Tools було використано такі:

1. Hillshade – це інструмент, призначений для створення зображення, що імітує освітлення поверхні рельєфу так, якби воно було підсвічено Сонцем. Тобто цей інструмент створює затінений рельєф з растрового знімку, враховуючи кут освітлення та тіні. З першого погляду на результат виконання тіньової відмивки, здається, що картина є вигравіюваною, наче було підсвічено всі рельєфні ділянки, які були до цього непомітними (рис. 2.2.2). Загалом ця функція створює тривимірне відображення поверхні місцевості у відтінках сірого з врахуванням відносного положення Сонця для затінення зображення.

У цьому інструменті завжди задається азимут освітлення та висота Сонця. Азимут – це взаємне положення Сонця вздовж горизонту, вказується в градусах, за замовчуванням в інструменті завжди стоїть 315° , тобто Сонце знаходиться з північного заходу. Такий параметр визначений для того, щоб наше око краще сприймало предмети, коли вони відкидають тінь в нижню частину карти. Інші азимути освітлення можуть створювати візуальний ефект поглиблення об'єктів, коли, наприклад, пагорби будуть схожі більше на западини. Висота – це кут піднесення Сонця над горизонтом, цей показник коливається від 0° (коли Сонце знаходиться на горизонті) до 90° (коли Сонце знаходиться над головою). За замовчуванням даний показник має середнє значення 45° , найбільш оптимальний варіант для помірних широт. Окремо в даному інструменті можна налаштувати Z factor – коефіцієнт масштабування, що використовується для перетворення значень висоти. Зазвичай даний параметр залишають за замовчуванням, він дорівнює одиниці.

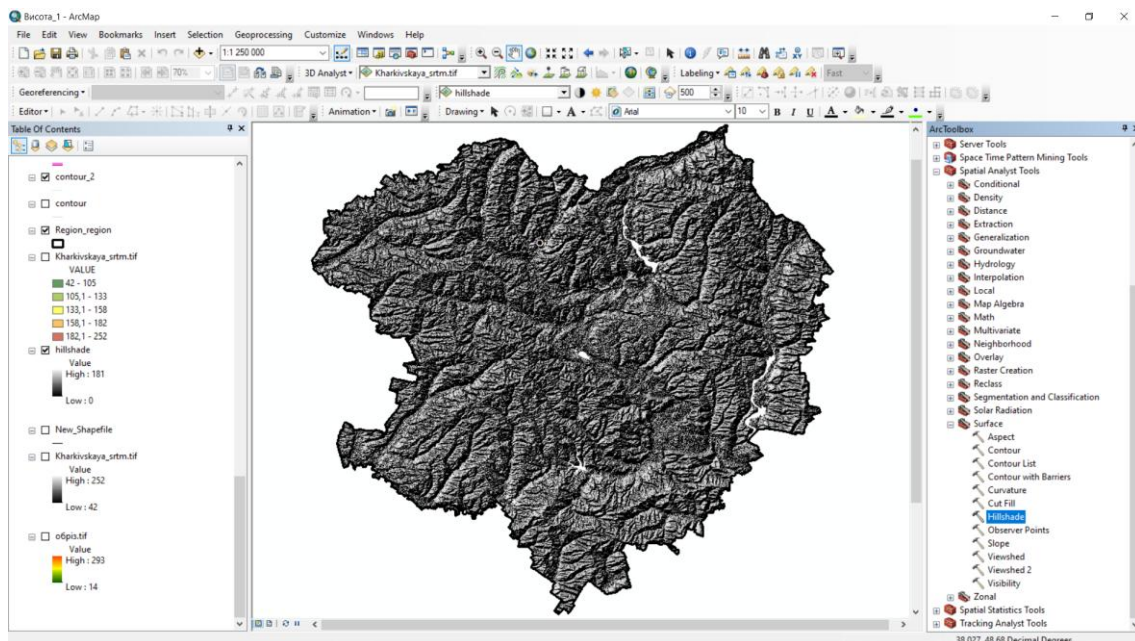


Рис. 2.2.2. Результат виконання дії Hillshade

2. Contour – це інструмент для створення ізоліній за даними цифрової моделі рельєфу. Створення та відображення горизонталей є поширеним завданням у програмному забезпеченні ArcGIS. Зазвичай цей процес є автоматизованим, користувач лише обирає інтервал через який будуть проведені горизонталі (у нашому випадку – 10 метрів). Проте є також можливості для обрання додаткових параметрів побудови горизонталей, так, наприклад, можна вибрати певне представлення ізоліній, це може бути просто контури або заповнені контури (рис. 2.2.3).

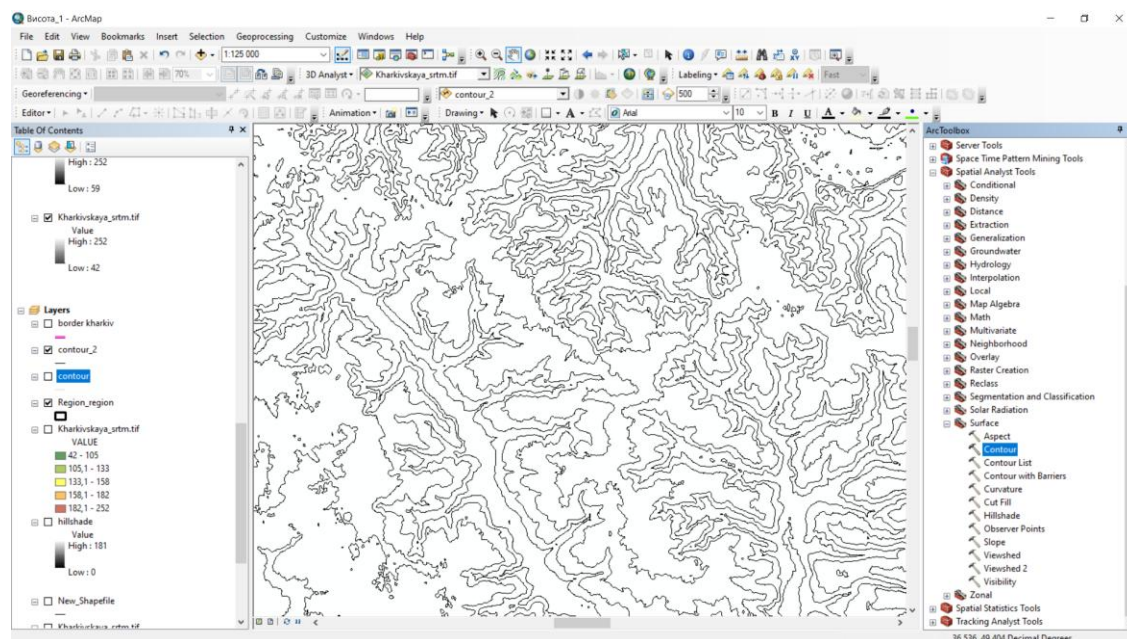


Рис. 2.2.3. Результат виконання дії Contour

Використавши ці два інструменти та створивши шар відмивки й горизонталей, можна перейти до візуалізації рельєфу. Першим кроком стане дублювання обрізаної цифрової моделі рельєфу та зміна її візуалізації, розбивка на 5 класів та зміна кольорів від зеленого до коричневого. Саме даний шар створить основу гіпсометричній шкалі. Далі робимо цей шар напівпрозорим. Ця дія необхідна для того, щоб показати крізь кольоровий шар відмивку рельєфу, з метою передачі об'ємності рельєфу. Додатково візуалізуємо горизонталі, що підкреслять форми рельєфу. Для цього горизонталі були зроблені майже повністю прозорими, при цьому вони окреслили основні форми рельєфу, хоч і є майже непомітними на карті. Також через висоту перерізу рельєфу – 10 м, горизонталі дуже щільно прилягають одна до одної, відповідно створюють певне затінення кольорової ЦМР. Після візуалізації основних тематичних та географічних елементів карти, можна перейти до створення карт-врізок.

Для створення карти-врізки експозиції схилів використовувався всього один інструмент з інших інструментів Spatial Analyst Tools, а саме:

1. Aspect – це інструмент, що обчислює напрямок, куди направлений схил в певній точці, тобто визначає експозицію схилів (рис. 2.2.4). До основних компонентів даного інструменту відноситься напрямок, що зазвичай вимірюється в градусах і вказується напрямок сторін світу (північ, південь, захід, схід і так далі). Щоб розрахувати даний показник в ArcGIS, потрібна лише цифрова модель рельєфу. Додатково в параметрах налаштування інструменту можна обрати метод обрахунку експозиції. Всього є два методи: PLANAR та GEODESIC. Метод PLANAR є стандартним та полягає в обчисленні експозиції на спроектованій площині, натомість під час використання методу GEODESIC розрахунок виконується в тривимірній декартовій системі координат (Земля в даному випадку представлена еліпсоїдом).

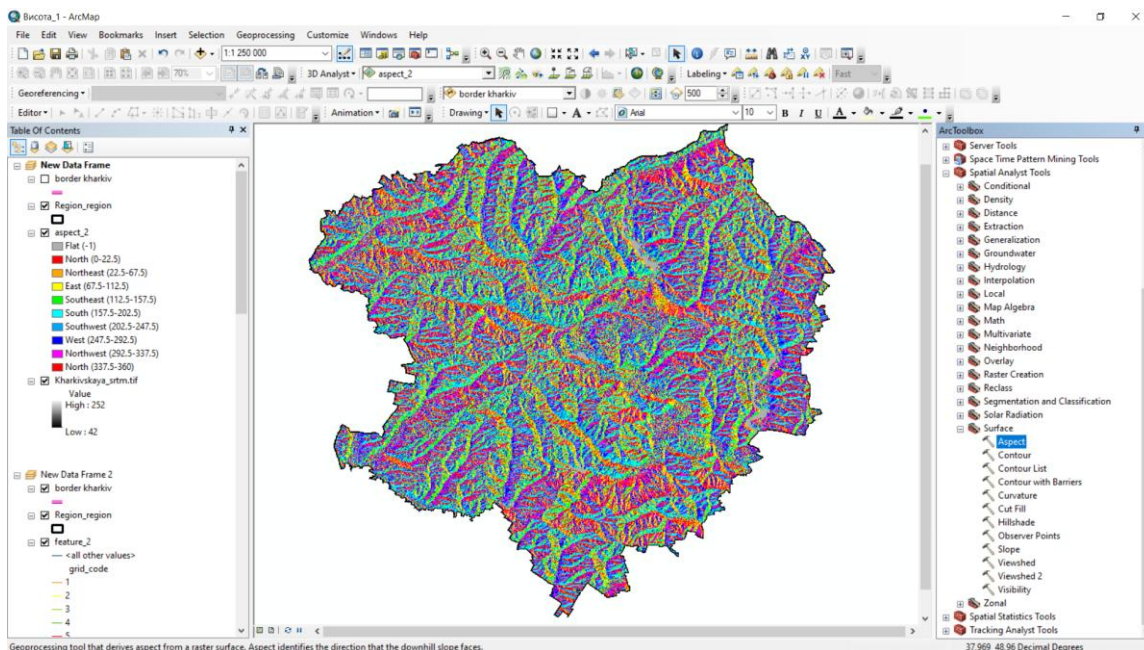


Рис. 2.2.4. Результат виконання дії Aspect

Карта одразу представлена експозицією схилів, додаткових дій з візуалізації вона не потребує, отже, вже все відображено, залишається лише узгодити з елементами географічної основи.

Для створення карти-врізки моделей річкового стоку використовувалося набагато більше інструментів Spatial Analyst Tools (дані інструменти потрібно використовувати у чіткій послідовності, щоб не відбулося помилки на певному етапі), ніж для створення карти експозиції схилів, а саме:

1. Fill – це інструмент призначений для заповнення пустот в растрі, щоб ліквідувати дрібні недоліки в даних. Єдиний параметр в даному інструменті, що підлягає заповнення – це Z limit, проте його також можна залишити за замовчуванням, оскільки ми можемо точно не знати максимальну різницю висот між пустотою та точкою її заповнення. Якщо не вказати даний параметр, то система автоматично заповнить всі пустоти незалежно від висоти.

2. Flow Direction – це інструмент, що дає можливість визначити напрямок потоку з кожного пікселю растра. За допомогою алгоритму даний інструмент рахує абсолютно усі чарунки (пікселі) і будує растр, де буде вказано напрям стоку, виходячи з того, який піксель по відношенню до сусіднього має найменшу висоту, тому що таким чином схил буде найкрутішим і вода буде стікати саме

найкрутішим схилом, оскільки там максимальна енергія потоку та дія гравітації. Для визначення напрямків потоку можна використовувати різні методи, так ArcMap надає три методи обчислення:

- D8 – цей метод призначає напрям потоку найкрутішому схилу, він визначений за замовчуванням і є найбільш використовуваним;
- MFD – цей метод засновується на призначенні потоку для всіх сусідніх комірок, що є меншими за висотою центрального пікселя, тобто потік спрямовується у кількох напрямках до всіх сусідів вниз по схилу;
- DINF (D-Infinity) – метод, що визначає напрямок потоку як найкрутіший низхідний схил на восьми трикутних гранях, сформованих у вікні 3x3 пікселів, центром якого є необхідний нам піксель.

3. Flow Accumulation – це інструмент за допомогою якого можна створити растровий шар зі значенням акумуляції стоку в кожній клітинці. Рельєф у цьому інструменті аналізується з точки зору, де та в яких чарунках найбільше акумулюється стоку і в такому випадку будуть підсвічені максимально ті пікселі, в які стікає вода з більшої кількості пікселів, що розташовуються вище за рельєфом. Стік в певні пікселі (які відповідають певній формі рельєфу) буде максимальним, якщо в нього буде стікати вода з максимальної кількості інших периферійних пікселів. Окремо в цьому інструменті можна обрати тип вихідних даних та метод визначення напрямку потоку (D8, MFD, DINF).

4. Set Null – це інструмент, що встановлює для визначених комірок значення на основі заданих критеріїв (рис. 2.2.5). Так, наприклад, під час виконання дії Flow Accumulation яскравість акумуляції підсвічує лише деякі з тальвегів з максимальною акумуляцією, тому потрібно вилучити ще зі знімку інформацію щодо тих пікселів, де є також такі пікселі акумуляції, але вони слабо видні. Для цього треба використати інструмент Set Null, взяти весь растр і виконати умову: для всіх чарунок, які мають акумуляцію більше за якийсь поріг (VALUE < 2 000) в полі Expression (optional), призначити значення «1» в полі Input false raster or constant value, а всім іншим «0».

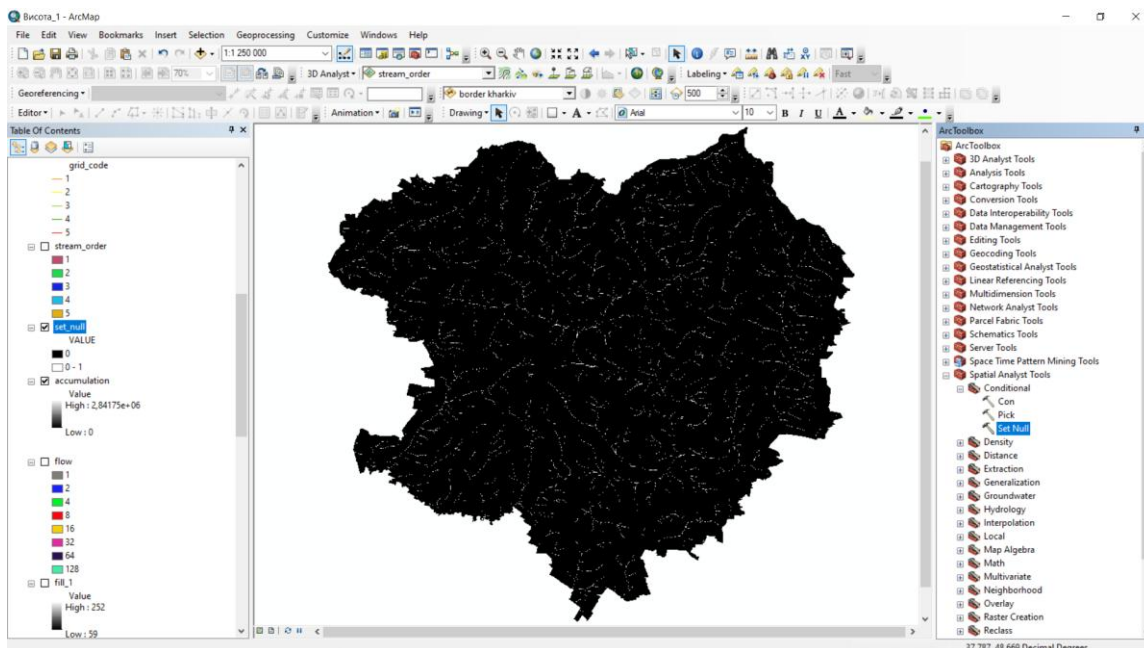


Рис. 2.2.5. Результат виконання дії Set Null

5. Stream Order – інструмент, що створює растровий шар, а саме призначає числовий порядок визначеним сегментам растру, які представляють гілки лінійної мережі. Цей інструмент підтримує лише растровий шар напрямку потоку зробленим методом D8. Окремо можна обрати метод, що використовується для визначення порядку потоків, так є вибір між числом Штралера та Шрива (рис. 2.2.6).

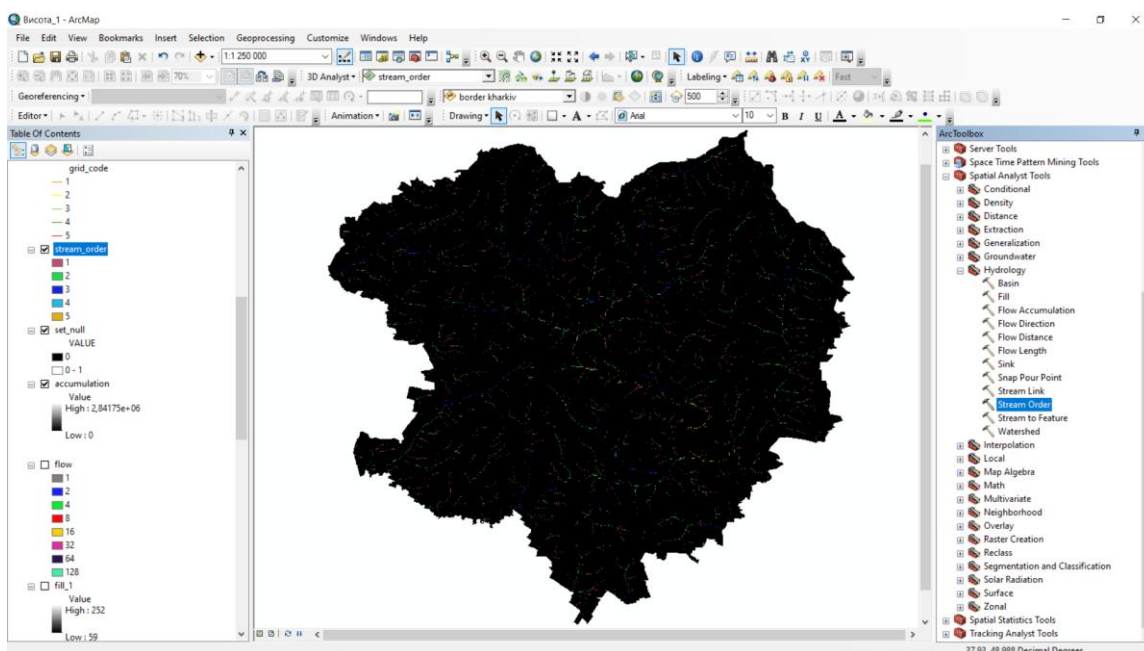


Рис. 2.2.6. Результат виконання дії Stream Order

6. Stream to Feature – інструмент, що призначений для векторизації потокових мереж або будь-якого іншого растру, що представляє растрову лінійну мережу, для якої відома спрямованість (рис. 2.2.7).

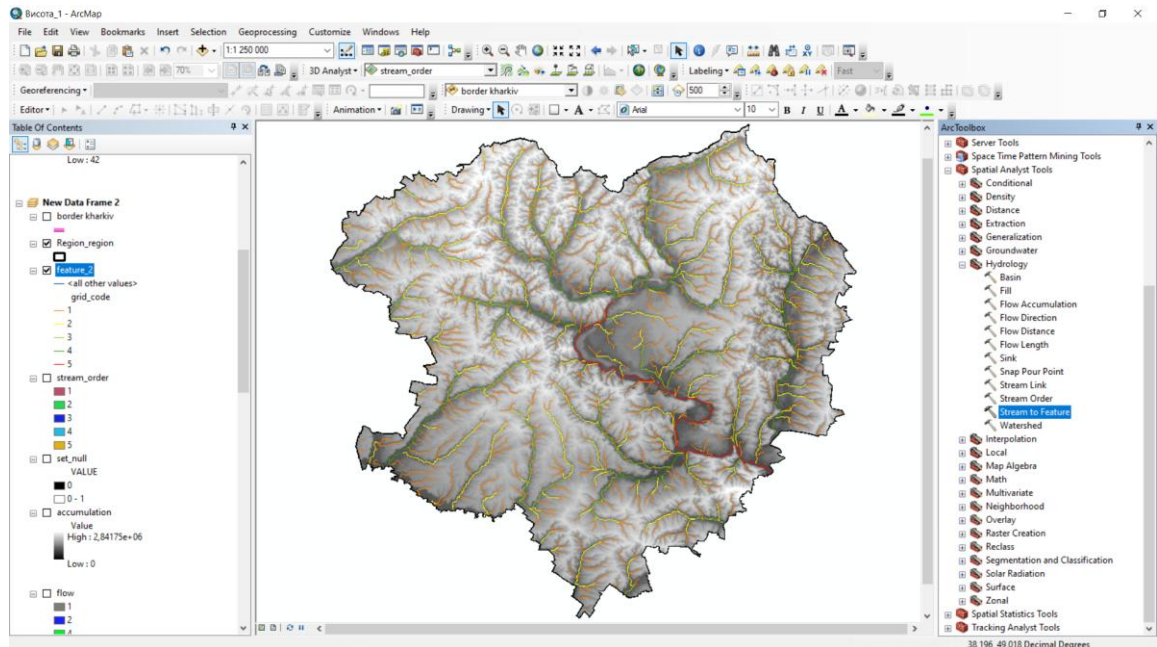


Рис. 2.2.7. Результат виконання дії Stream to Feature

Після виконання усіх необхідних інструментів й створення результуючого векторного шару з порядками водотоків, потрібно їх візуалізувати залежно від порядку, тобто змінити їх ширину та колір.

У результаті проведеної роботи над цифровою моделлю рельєфу Харківської області з застосуванням інструментів Spatial Analyst Tools, ми отримали тематичну карту, що складається з основної карти, де відображений рельєф області, та двох карт-врізок – експозиції схилів та моделей річкового стоку. Створена тематична карта Харківської області показує те, як може бути створена карта рельєфу в ГІС буквально за декілька годин, за допомогою автоматизованих процесів, що раніше вимагали б великої кількості ручної роботи, а це допомагає значно зекономити час і ресурси при створенні карт, уникнути людської похибки.

Таким чином, сучасні технології, зокрема ГІС, зробили революцію в побудові ЦМР та тематичних карт порівняно з традиційними методами. Геоінформаційні системи дозволяють обробляти дані висот для створення точних

моделей рельєфу, об'єднувати дані з різних джерел, щоб створювати тематичні карти. Також традиційне картографування рельєфу може бути менш точним і менш деталізованим, особливо при великих масштабах, залежно від джерела, може бути обмеженим в можливостях представлення деталей рельєфу. Натомість геоінформаційне картографування забезпечує вищу точність і більшу деталізацію завдяки використанню досить детальних цифрових даних. Також ГІС дозволяють в реальному часі актуалізувати дані.

Загалом геоінформаційне картографування рельєфу є сучасним і достатньо потужним інструментом, що відкриває широкий вибір можливостей аналізу рельєфу та сприяє покращенню ефективності й точності в цьому процесі. Проте й традиційне картографування рельєфу залишається досить важливим, оскільки саме воно зародило створення різноманітних способів зображення рельєфу, деякі з яких реалізуються в геоінформаційних системах (наприклад, побудова горизонталей).

Проаналізувавши сучасний стан розвитку геоінформаційних технологій, можна сказати, що їх майбутнє стоїть за постійним прогресом. Перш за все будуть удосконалюватися вже існуючі технології. Дані дистанційного зондування ставатимуть все більш доступними, матимуть кращу роздільну здатність, що дасть можливість створювати точне відображення рельєфу для великих територій. Розвиватимуться й геоінформаційні системи. Покращуватиметься функція 3D-моделювання, моделі ставатимуть все більш детальними, розвиватимуться алгоритми затінення та освітлення тривимірних зображень.

Також до перспектив можна віднести динамічну візуалізацію в режимі реального часу, тому що зі збільшенням доступності потоків даних у режимі реального часу та покращеними можливостями обробки візуалізація місцевості стане більш динамічною. Користувачі зможуть переглядати та взаємодіяти з картами рельєфу, які постійно оновлюються для відображення змін у реальних умовах через свої смартфони підключившись до мережі Інтернет.

Нові технології, такі як штучний інтелект, віртуальна та доповнена реальність змінять картографування рельєфу, вони підвищать точність й ефективність аналізу даних [63]. Штучний інтелект у майбутньому скоріше за все інтегрується з геоінформаційними системами, а це зможе повністю автоматизувати процес створення карти, від людини буде потрібен лише запит, за яким ця технологія побудує карту. Також штучний інтелект зможе пришвидшити обробку даних або ж буде робити її без людського втручання. Віртуальна та доповнена реальність допоможе користувачам безпосередньо взаємодіяти з цифровим зображенням рельєфу. Такі технології зможуть використовуватися для детального вивчення території, для ознайомлення з місцевістю, наприклад, під час практики, оскільки дозволятимуть бачити рельєф так, як в реальному житті.

Це лише деякі потенційні перспективи відображення рельєфу в майбутньому. Оскільки технології продовжують розвиватися, можна очікувати, що візуалізація рельєфу стане більш потужною.

РОЗД.ІІІ 3. СТВОРЕННЯ КАРТОГРАФІЧНОГО ЗОБРАЖЕННЯ РЕЛЬЄФУ СПОСОБОМ ШТРИХУВАННЯ В ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВІ ТРАДИЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ

3.1. Існуючі реалізації способу штрихування в геоінформаційних системах

Як відомо спосіб штрихування відійшов у минуле картографування, коли з'явився спосіб горизонталей, відбулося це у ХІХ столітті, як тільки топографічне знімання досягло значного прогресу. Лише у другій половині ХХ століття серед картографів постало питання, а як же автоматизувати цей досить виразний пластичний спосіб зображення рельєфу в геоінформаційному картографуванні, оскільки інші способи зображення, особливо горизонталі, є достатньо розвиненими й автоматизованими.

Першим цим питанням зайнявся ізраїльський вчений Пінхас Йоелі, що у 1985 році випустив працю про топографічне відображення рельєфу штрихуванням за допомогою комп'ютера [27]. У цій роботі автор висвітлював тему створення штрихування за цифровою моделлю рельєфу. Метод, що описаний Пінхасом Йоелі, спирається на горизонталі, які побудовані на основі цифрової моделі рельєфу. З горизонталей виходять прямі лінії, які є перпендикулярними до ізоліній, що показують більшу висоту. У результаті було отримане зображення рельєфу для міста Хайфа в Ізраїлі, що справді схоже на традиційне штрихування (рис. 3.1.1). Але на зображенні можна побачити ряд невідповідностей штрихів формам рельєфу, в деяких місцях спостерігається їх надмірне скупчення, а в інших відсутність. Проте не дивлячись на ці недоліки, на рік моменту видання статті це було значним проривом, адже в цей час тільки йшло становлення та початок активного користування геоінформаційними системами. Стаття відкрила нові можливості геоінформаційних систем для картографування рельєфу.

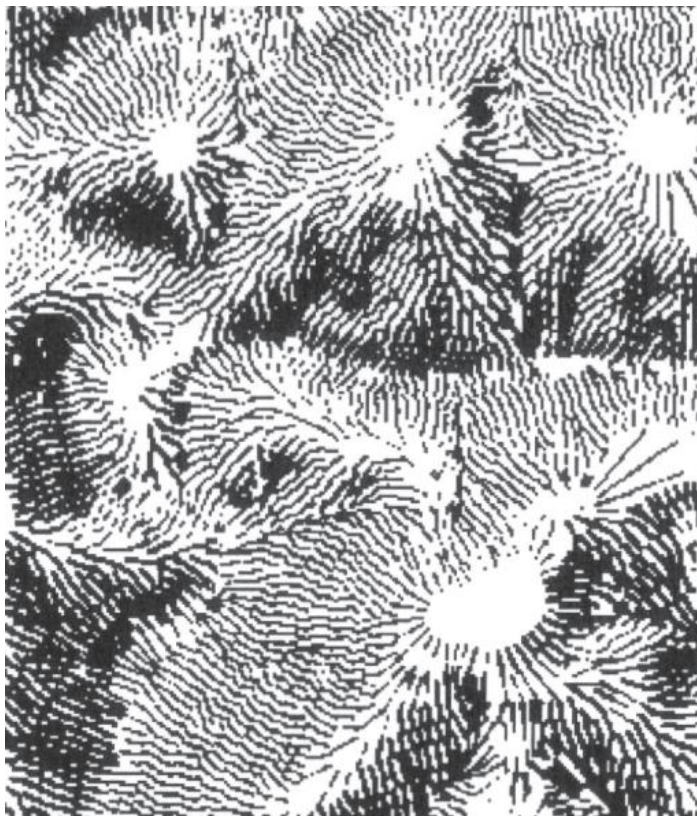


Рис. 3.1.1. Карта території на південь від м. Хайфа, Ізраїль, виконана автоматизованим способом штрихування. Робота Пінхаса Йоелі. 1985 р. [22]

Подальший розвиток реалізації способу штрихування в геоінформаційному картографуванні припинився й розпочався лише на початку XXI століття та продовжується зараз. Першою працею на зламі століть, у 2000 році, стала робота Патріка Кеннеллі та Джона Кімерлінга, в якій був розроблений алгоритм побудови способу штрихування для дрібномасштабних карт [23]. Алгоритм побудови штрихування, створений для програмного забезпечення ESRI ArcView 3.2, спирається на цифрову модель рельєфу. Далі за цифровою моделлю рельєфу розраховуються значення нахилу й експозиції схилів, за якими й будуть візуалізуватися штрихові лінії. Наступним кроком в алгоритмі є створення точок за утвореними сітками значень нахилу й експозиції схилів, висоти, що будуть використовуватися як основа побудови штрихів. Штрихові лінії у даному алгоритмі орієнтовані відповідно до найкрутішого схилу. Також було використано ефект похилого освітлення території, що досягається за рахунок різного кольору штрихових ліній, залежно від експозиції (рис. 3.1.2).

Хоч дана реалізація способу штрихування є в деякому сенсі узагальненою, не використовує всіх значень цифрової моделі рельєфу, на ній не змінюється довжина штрихових ліній залежно від нахилу схилу, але такий алгоритм побудови штрихування є достатньо зрозумілим, окрім цього багато напрацювань зараз базуються саме на цьому методі.

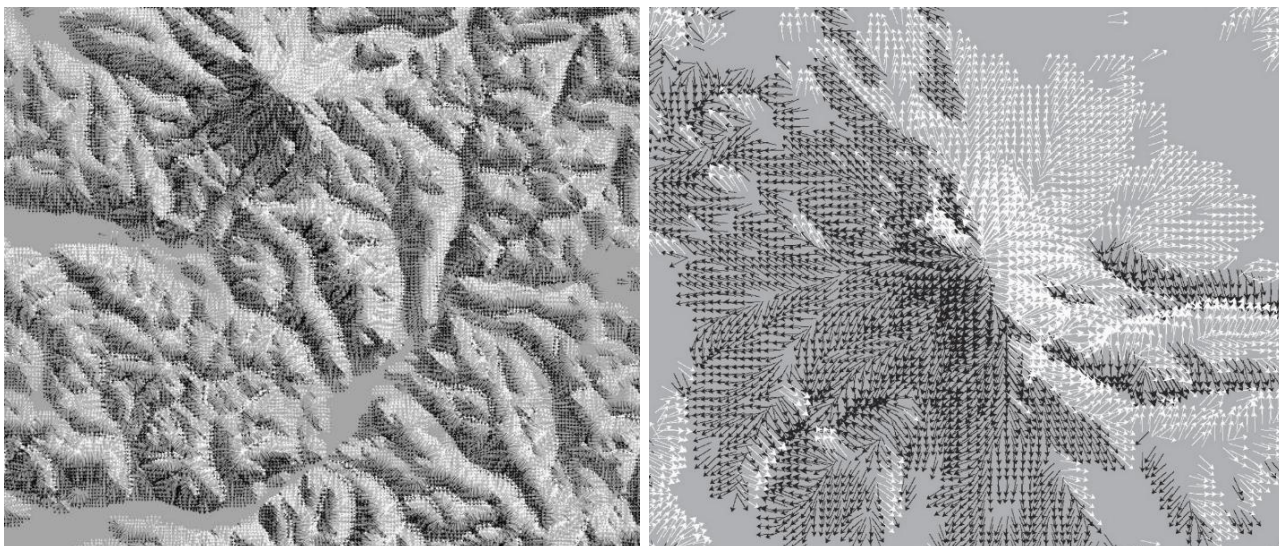


Рис. 3.1.2. Частина карти території вулкану Адамс, штат Вашингтон, США, виконана автоматизованим способом штрихування. Робота Патріка Кеннеллі, Джона Кімерлінга. 2000 р. [22; 23]

Наступною роботою, що вийшла також на початку ХХІ століття, а саме у 2002 році, є праця Патріка Кеннеллі, яка показує спосіб зображення рельєфу з орієнтованими півтонами [22]. Штрихування в цьому випадку обчислюється на основі цифрової моделі рельєфу, а саме на її перекласифікації 256 відтінків сірого на 16 класів з рівними інтервалами. Після цього створюється сітка експозиції схилів, що перекласифіковується на 12 класів з рівними інтервалами. Далі між собою поєднуються класи експозиції та відмивки ЦМР і по цьому створюються точки. Останнім етапом в алгоритмі є візуалізація точок, де кожна точка показується відповідним до значень експозиції та відмивки растровим зображенням (рис. 3.1.3). У цьому алгоритмі ми не можемо побачити традиційних штрихових ліній, як на шкалі Лемана, але візуально даний спосіб дуже сильно схожий на штрихування, він не містить прогалів у зображенні, зображення є пластичним, передає особливості рельєфу, показує освітленість

схилів. Тому як певну альтернативну в геоінформаційному картографуванні традиційному способу штрихування експеримент Патріка Кеннеллі можна вважати успішним

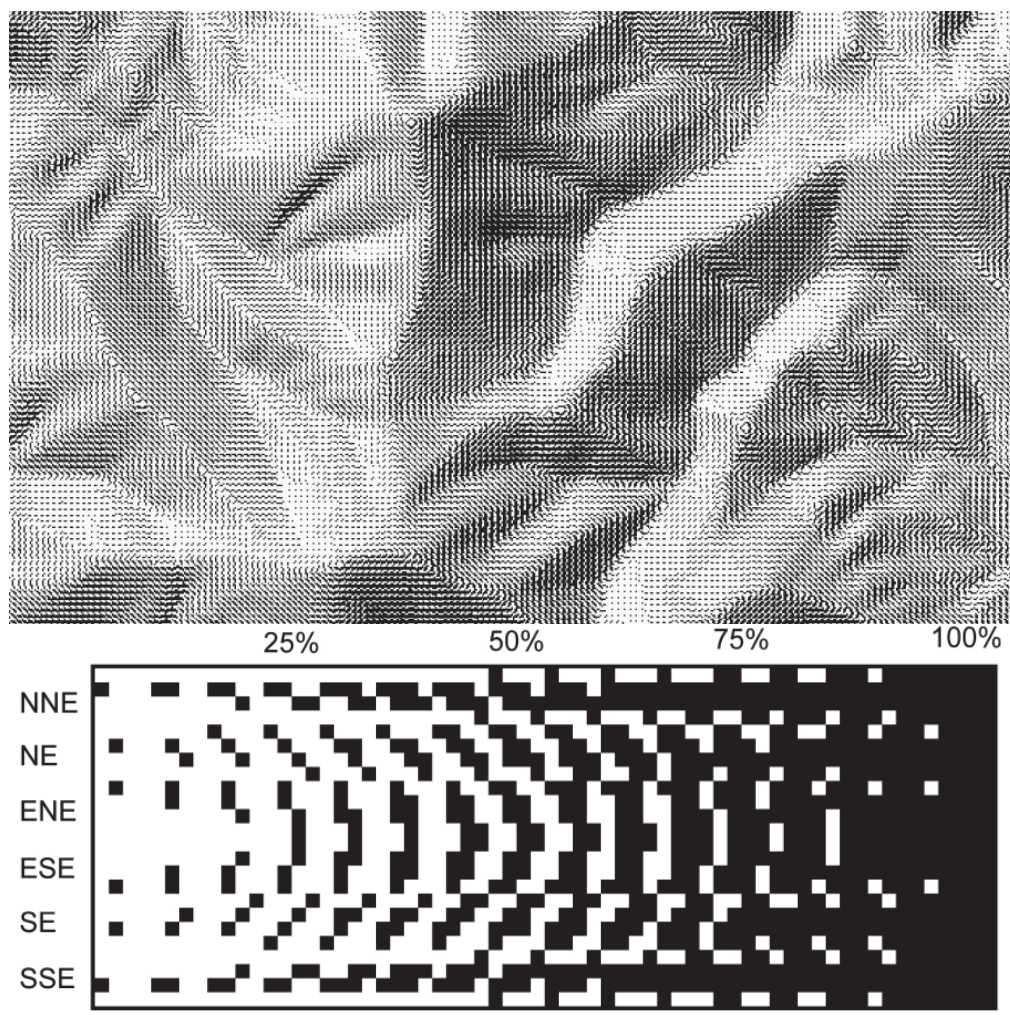


Рис. 3.1.3. Частина карти території Світ-Грасс Хіллс, штат Монтана, США, виконана автоматизованим способом орієнтованих півтонів.

Робота Патріка Кеннеллі. 2002 р. [22]

У 2007 році вийшла стаття щодо відображення рельєфу місцевості за допомогою кутів нахилу схилів та освітлення, що базується на нефотореалістичному рендерингу, тобто на такій галузі комп'ютерної графіки, в якому створюються імітації різноманітних стилів, які запозичені з рукописних зображень, включаючи й карти на яких спосіб штрихування створений вручну [15]. Алгоритм, описаний у статті, дає можливість створити спосіб штрихування у більш вільний спосіб, він не є традиційним, але його можна використовувати

для представлення рельєфу на карті (рис. 3.1.4). На відміну від описаних вище алгоритмів створення штрихування, у цьому випадку штрихові лінії створюються не з горизонталей або точок, а вільно розташовані, не прив'язуючись до векторних основ. Тобто у цій реалізації рельєф показаний вільними лініями. Цей метод базується на цифровій моделі рельєфу, що потім інтегрується з 3D-моделлю високої роздільної здатності, що є основою для рендерингу. Потім за даними ЦМР обчислюються висоти території та траєкторія для кожного штриха, що буде розташовуватися за напрямком схилу. Далі для штрихових ліній визначається товщина і певна хвилястість, що пов'язано з можливими помилками при ручному нанесенні штрихів на карту. Цей метод побудови штрихування досить ефективно передає форми рельєфу на карті, при цьому залишаючи місце для зображення інших елементів з метою ефективного аналізу місцевості.

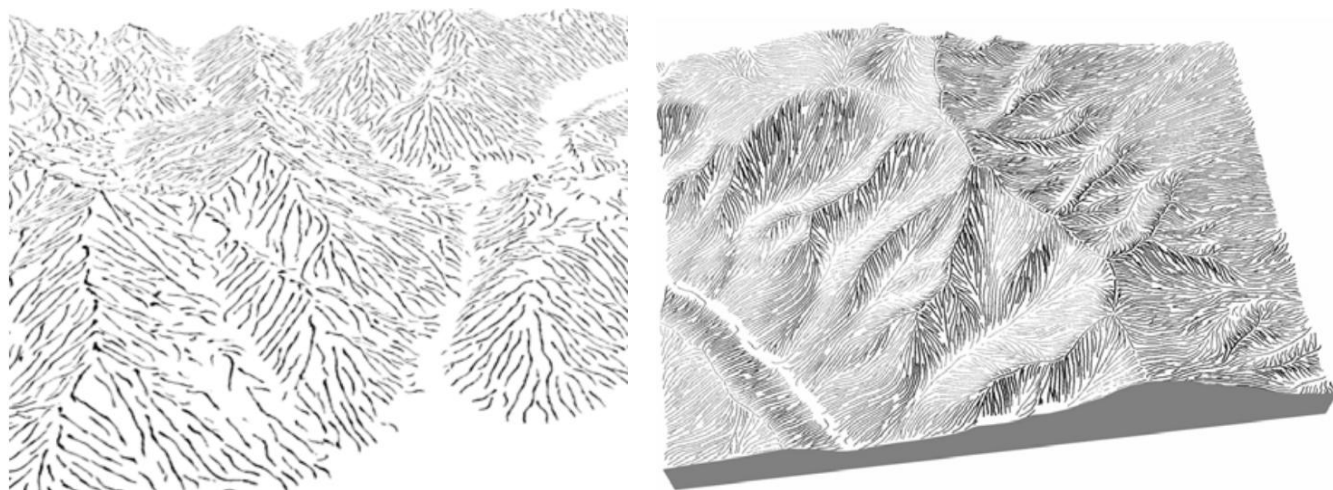


Рис. 3.1.4. Реалізація способу штрихування в нефотореалістичному рендерингу. 2007 р. [15]

На сучасному етапі розвитку вже створюються інструменти для повністю автоматичної побудови штрихових ліній за цифровою моделлю рельєфу. Так, Т. Самсонов створив початковий код інструменту Nachure для геоінформаційної системи QGIS, розроблений на основі інструментів плагіну WhiteboxTools, що полягає у створенні штрихових ліній, використовуючи лише цей інструмент (рис. 3.1.5). У параметрах цього інструменту вказується, яку цифрову модель потрібно

використати для створення штрихів, висота перерізу рельєфу, початкова висота горизонталі від якої ведеться відлік, згладжування горизонталей, також потрібно задати відстань, на якій штрихові лінії починаються вздовж горизонталі, мінімальну та максимальну відстань, на якій штрихи можуть сходитися та розходитися, максимальний та мінімальний кут повороту штрихів. Тобто створення штрихування цим інструментом базується на цифровій моделі рельєфу і побудованих за нею горизонталей. Але потрібно сказати, що даний спосіб ще не отримав свою реалізацію в плагіні WhiteboxTools, тому використання цього плагіну у вільному доступі ускладнюється.

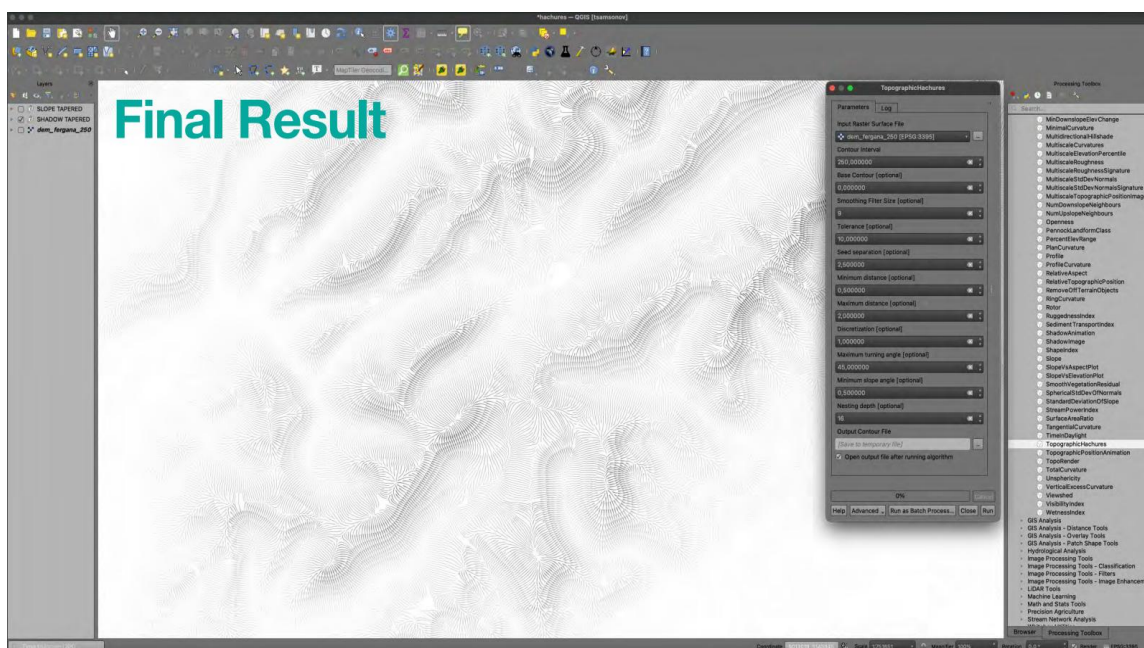


Рис. 3.1.5. Штрихування створено з використанням інструменту Hachure в QGIS. Робота Тимофія Самсонова. 2023 р. [26]

Що ж стосується доступних алгоритмів для реалізації штрихування, то в мережі Інтернет можна знайти різні методи побудови способу штрихування, які базуються на роботах, що описані вище. Більшість з цих способів реалізовані в геоінформаційній системі QGIS, що є загальнодоступною. Перший з алгоритмів, що одразу з'являється при пошуку створення штрихування, розроблений Робіном Хоуксом і спирається на цифрову модель рельєфу. З цифрової моделі рельєфу створюється шар горизонталей, шар кутів нахилу та експозиції схилів. Далі вздовж ізоліній створюються точки через певний заданий інтервал, та після точки

поєднуються зі значеннями схилу й експозиції. Останнім кроком є створення візуалізації точок для створення штрихових ліній через зміну символіки, де можна налаштувати товщину, довжину (рис. 3.1.6). Але не дивлячись на те, що у цьому способі вказана зміна довжини залежно від нахилу схилу, видимої зміни довжини не відбулось. Тож як певну інтерпретацію способу штрихування отриманий результат можна вважати успішним [49].

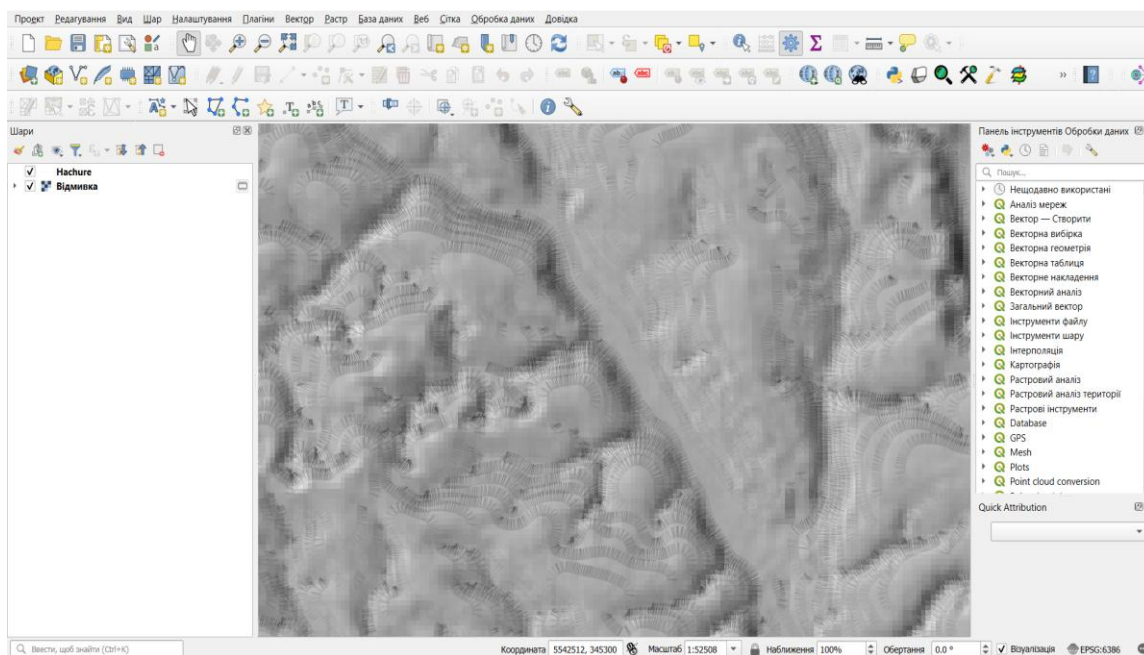


Рис. 3.1.6. Автоматизоване створення штрихування в QGIS за алгоритмом Робіна Хоукса для території на південь від м. Харкова

Наступний алгоритм, що знайдений в мережі Інтернет, також базується на використанні експозиції та нахилу схилів (рис. 3.1.7). Єдиною відмінністю є створення регулярних точок не вздовж ізоліній як в попередньому випадку, а вздовж всього растру. Далі утворені точки поєднуються зі значеннями експозиції і нахилу схилів, а після змінюють їх умовні позначення (зміна маркеру на лінію). Даний алгоритм побудови створює штрихові лінії, які хоч і змінюють свій колір, проте не мають зміни товщини [55]. Схожі реалізації способу штрихування існують в ArcGIS Pro та іншому програмному забезпеченні, що дозволяє працювати з графічними елементами, так, наприклад, спосіб штрихування може бути реалізований вручну в Adobe Photoshop.

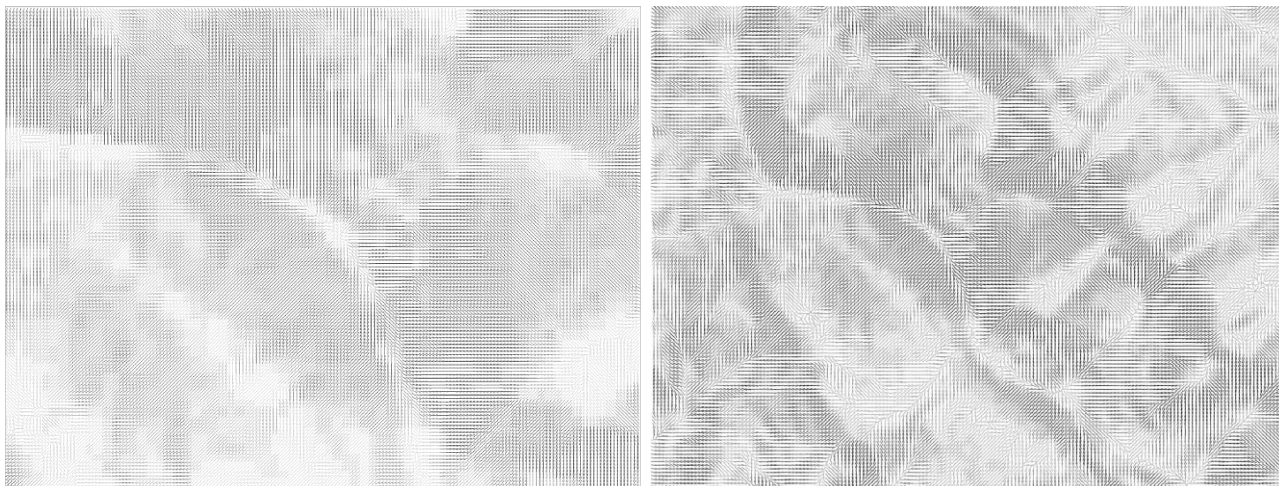


Рис. 3.1.7. Автоматизоване створення штрихування в QGIS для гори Говерли на основі регулярних точок, що розташовані через 10 та 25 метрів, вздовж всього растру

Також існують альтернативні методи створення штрихування, що засновані на зміні умовних позначень горизонталей. Наприклад, в ArcGIS Pro Джоном Нельсоном розроблений пакет різних візуалізацій горизонталей для рендерингу штрихових ліній. Такий метод є достатньо швидким і простим, можна просто створити горизонталі і візуалізувати їх одним з доступних стилів. Завантаживши цей пакет стилів, було виявлено, що лише один зі стилів, під назвою *NachureLongStroke*, найбільше схожий на оригінальний спосіб штрихування (рис. 3.1.8 А). Інші ж стилі гарно візуалізують горизонталі, їх можна використовувати для виразності карт, але вони не відповідають істинному способу штрихуванню [44; 59].

Отже, проаналізувавши різні реалізації способу штрихування в геоінформаційному картографуванні потрібно сказати, що дане питання ще й досі продовжує залишатися відкритим, оскільки кожен з алгоритмів побудови може бути доопрацьованим. Окрім цього не кожен з проаналізованих методів є доступним або може не повністю виправдати очікування людини, що робить карту, оскільки штрихи в кожному способі відрізняються за своєю візуалізацією. Але потрібно сказати, що не дивлячись на все це, питання побудови штрихування в геоінформаційному картографуванні ще довго залишиться актуальним для дослідників, адже кожен в ньому може знайти те, що хоче відобразити саме він.

Проаналізувавши десятки різних алгоритмів реалізації штрихування, можна прийти до висновку, що хоч деякі способи і є схожими за своєю побудовою, але в кожного відображення штрихування на карті відрізняється.

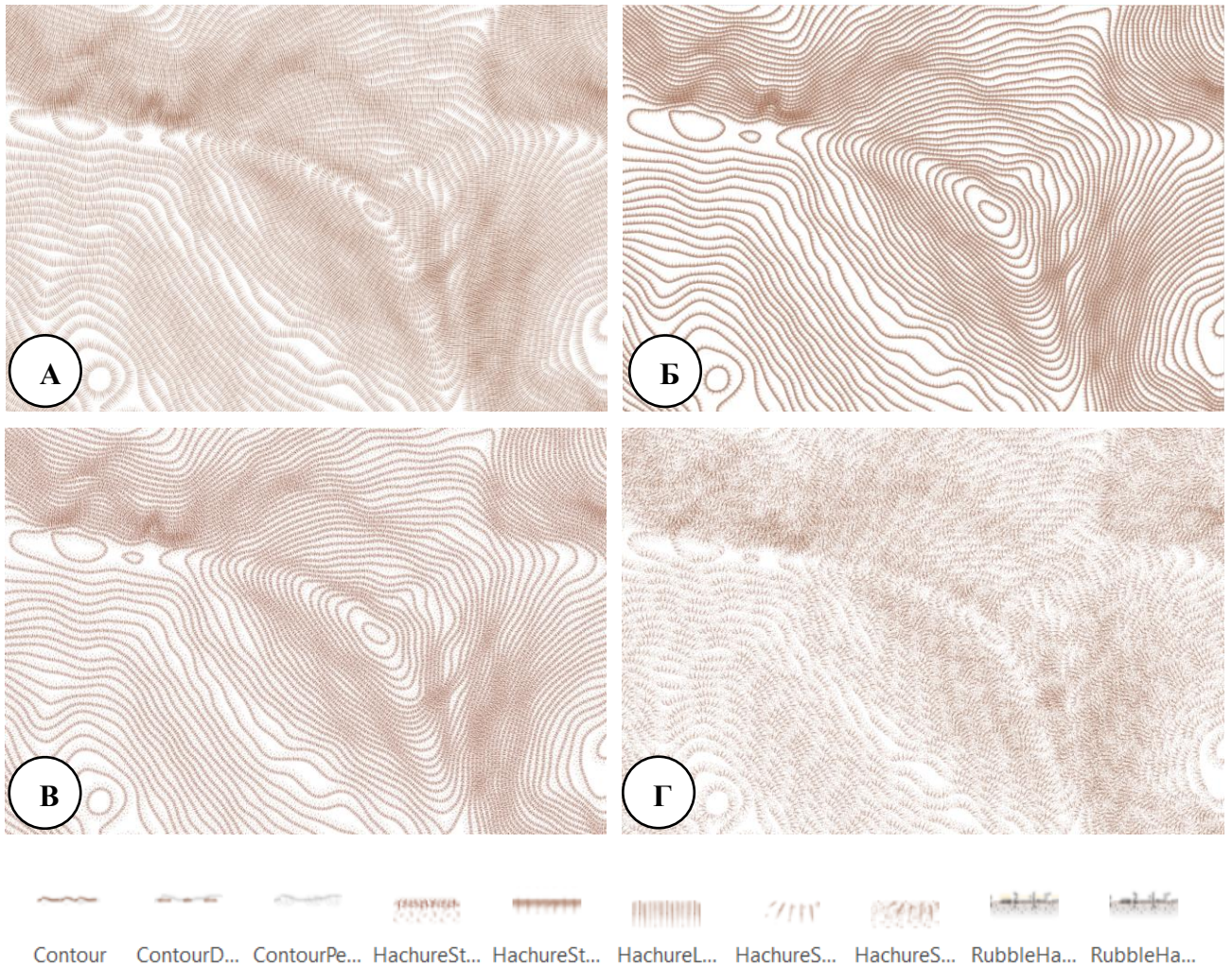


Рис. 3.1.8. Візуалізація горизонталей різними умовними позначеннями, що схожі на штрихування для гори Говерли в ArcGIS Pro

3.2. Розробка алгоритму побудови способу штрихування в геоінформаційній системі QGIS

У мережі Інтернет можна знайти багато різних алгоритмів побудови способу штрихування в таких геоінформаційних системах як ArcGIS та QGIS, також використовуються різні графічні редактори. Але, на жаль, не всі алгоритми станом на 2024 рік є доступними, тому що деякі інструменти для побудови штрихів можуть бути застарілими, а деякі – ще не отримали потрібного оновлення або реалізації у відповідній програмі. Так, наприклад, уже існує початковий код, написаний мовою Python, для інструмента, що по растру буде вираховувати штрихи, проте його реалізація в плагіні WhiteboxTools в QGIS ще не відбулась [66].

Тож постало питання необхідності розробки алгоритму реалізації даного способу зображення рельєфу в геоінформаційній системі, що буде доступним для всіх й водночас актуальним. Спосіб штрихування є насправді унікальним, оскільки виразність карт, що побудовані при використанні даного способу вражає й зараз, при активному використанні комп'ютерів. У даній частині ми намагатимемося розробити алгоритм, що допоможе наблизитися до цього класичного способу. За основу був взятий алгоритм Робіна Хоукса, а саме те, що алгоритм буде спиратися на горизонталі, які будуть побудовані за цифровою моделлю рельєфу. Також було взято вираз з веб-сайту Stack Exchange з метою створення штрихів між горизонталями [38, 49].

Для виконання поставленого завдання використано цифрову модель рельєфу SRTM DEM з роздільною здатністю 30 м, що стане основою для побудови горизонталей. Ці висотні дані були отримані через проведення місії Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) під час одинадцятиденного спостереження (з 11 по 22 лютого) у 2000 році, завдяки якій було отримано ЦМР майже в глобальному масштабі, оскільки зйомка охоплювала територію між 60° північної широти та 56° південної широти, а це близько 80% земної поверхні.

SRTM DEM є однією з найбільш точних і повних даних, що колись були створені у вільному доступі [57].

Загалом у вільному доступі існують такі цифрові моделі рельєфу як ASTER GDEM та SRTM DEM. ASTER має втричі більшу просторову роздільну здатність за SRTM (відповідно 30 метрів та 90 метрів), для певних територій є однаковою (30 метрів). Але ASTER GDEM має меншу точність, як вертикальну, так і горизонтальну. Вертикальна точність для SRTM DEM сягає приблизно 14 метрів, горизонтальна – 10 метрів, для ASTER GDEM ці показники сягають 20 і 30 метрів. Це пояснюється більшою роздільною здатністю і відповідно кращою чутливістю артефактів.

При порівнянні побудованих горизонталей за даними цифровими моделями рельєфу було виявлено, що все ж краще для роботи з рельєфом підходить SRTM DEM, горизонталі по даній ЦМР є більш плавними навіть без згладжування, також можна побачити чітку відповідність формам рельєфу. Натомість горизонталі отримані з ASTER GDEM є грубими та потребують згладжування (рис. 3.2.1). Тому для побудови штрихування було використано саме цифрову модель рельєфу SRTM DEM [12].

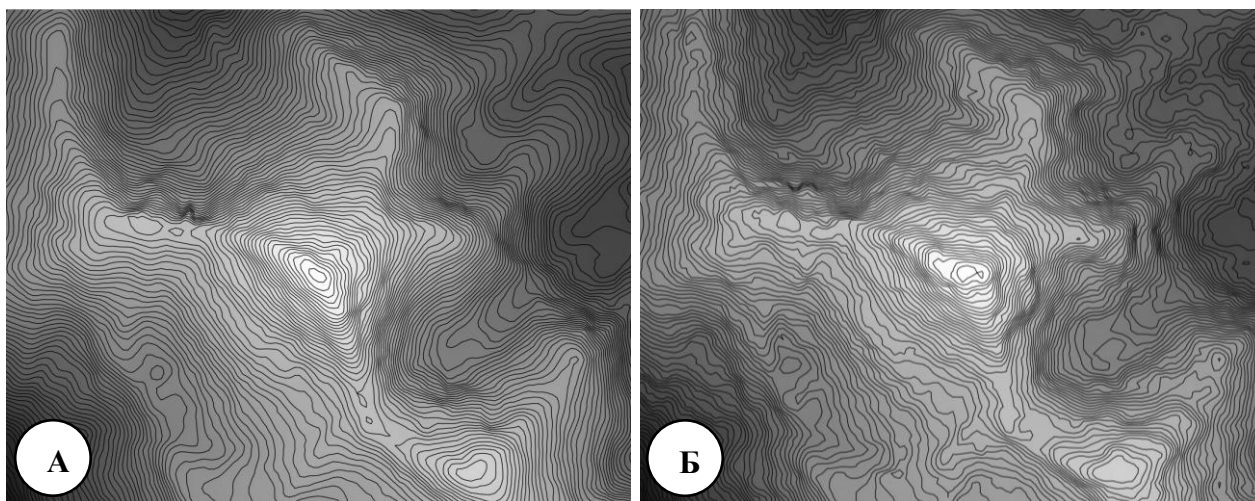


Рис. 3.2.1. Порівняння побудованих горизонталей за двома різними цифровими моделями рельєфу: А – SRTM DEM; Б – ASTER GDEM

Але, незважаючи на це, потрібно сказати, що цифрові моделі рельєфу як ASTER GDEM, так і SRTM DEM, зробили значний внесок у наукові дослідження

та практичне застосування у різних напрямках, включаючи й картографію, надаючи дані про висоту, що є у вільному доступі для користувачів по всьому світу. Дані ЦМР сильно допомагають, коли відсутні високоточні цифрові моделі рельєфу, що можуть бути отримані з БПЛА або комерційних супутникових систем.

Завантаження необхідної цифрової моделі рельєфу SRTM DEM відбувалося з Earthdata Search – веб-сайту, що забезпечує пошук даних спостереження за Землею в архіві NASA. Доступ до цього сервісу відкривається через створення облікового запису. Тож зареєструвавшись, було обрано область дослідження, що нас цікавить. Після цього серед інструментів було обрано SRTM, в результаті з'явилися цифрові моделі рельєфу, що відповідають обраним умовам (рис. 3.2.2). Завантажуємо необхідну ЦМР [10].

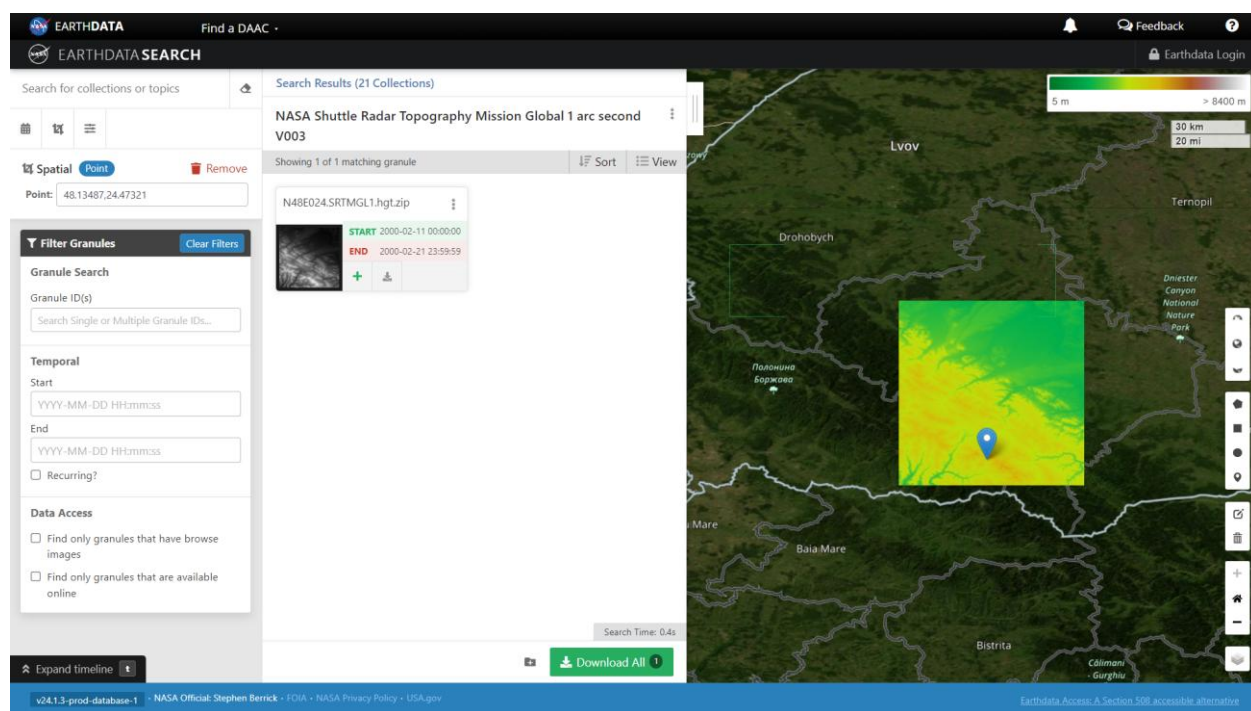


Рис. 3.2.2. Завантаження цифрової моделі рельєфу з веб-сайту Earthdata Search [41]

Деякі з геоінформаційних систем надають можливість переглядати і завантажувати цифрові моделі рельєфу безпосередньо з програми, наприклад, ця можливість є в QGIS, де за допомогою плагінів QuickMapServices та SRTM-Downloader можна підтягувати необхідні дані.

Для реалізації поставленої мети, а саме створення картографічного зображення рельєфу способом штрихування в геоінформаційних системах на основі традиційного картографування, було використане програмне забезпечення QGIS версії 3.28 – геоінформаційна система з відкритим кодом, що надає багато можливостей для побудови різних способів зображення рельєфу.

Загалом порядок роботи для побудови способу штрихування такий:

1. Створення порожнього проєкту та його збереження у відповідній теці.
2. Завантаження цифрових моделей рельєфу у проєкт, якщо потрібно зробити об'єднання растрів.

3. Перепроєкціювання цифрової моделі рельєфу у прямокутну систему координат, що відповідає області дослідження, щоб в подальшому створити точки за геометрією ліній через певний проміжок в метрах.

4. Створення шейп-файлу області, що досліджується.

5. Вирізання цифрової моделі рельєфу за шейп-файлом області дослідження.

6. Побудова ізоліній за обрізаною цифровою моделлю рельєфу.

7. Згладжування ізоліній.

8. Якщо ізолініями окреслено багато локальних знижень, що можуть заважати в подальшому побудові штрихів, то необхідно створити вибірку ізоліній, за умови, що їхня довжина буде дорівнювати більше певного значення, наприклад 500 метрів. Збереження вибраних об'єктів в новий векторний шар.

9. Розділення векторного шару горизонталей за атрибутами даних висот.

10. Побудова точок вдовж геометрії, а саме загладжених ізоліній.

11. Робота над візуалізацією шару точок, що є основою штрихів.

У будь-якій геоінформаційній системі робота починається зі створення проєкту, QGIS не є виключенням, перш ніж працювати над цифровою моделлю рельєфу було створено порожній проєкт та збережено його у відповідній теці (рис. 3.2.3).

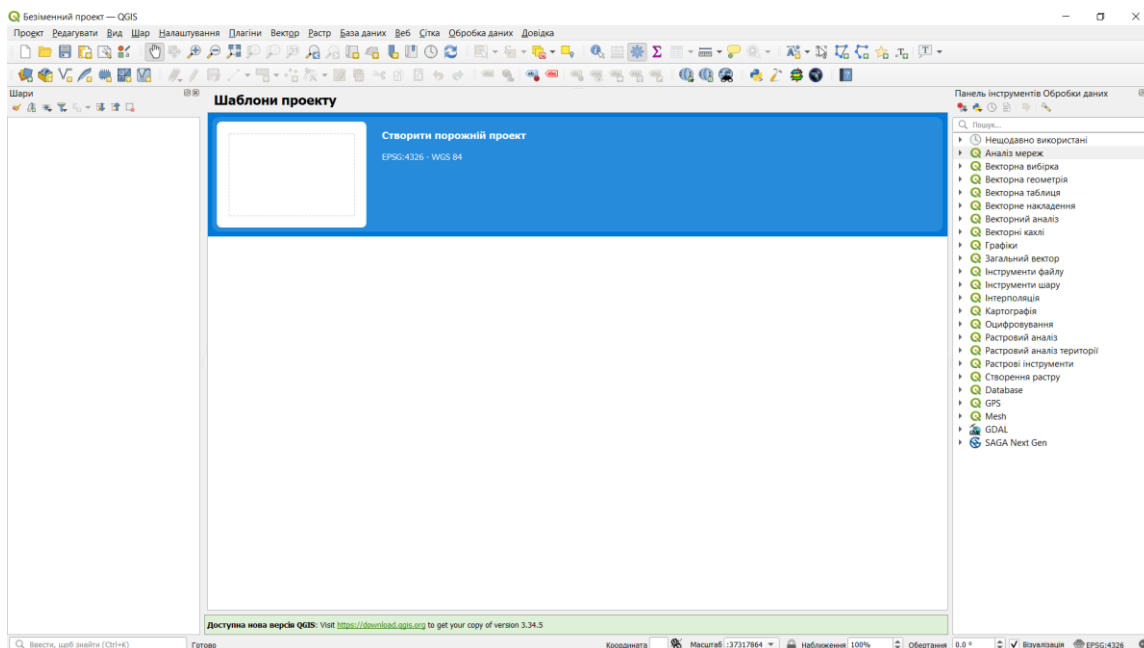


Рис. 3.2.3. Створення порожнього проекту в QGIS

Наступною дією є додавання необхідних растрів, відповідно було обрано попередньо завантажену цифрову модель рельєфу з веб-сайту Earthdata Search, що включає територію Українських Карпат (рис. 3. 2.4). Додавання попередньо завантажених растрів здійснюється через меню Шар → Додати шар → Додати растровий шар. Безпосередньо завантажити дані з QGIS можна через плагіни QuickMapServices та SRTM-Downloader.

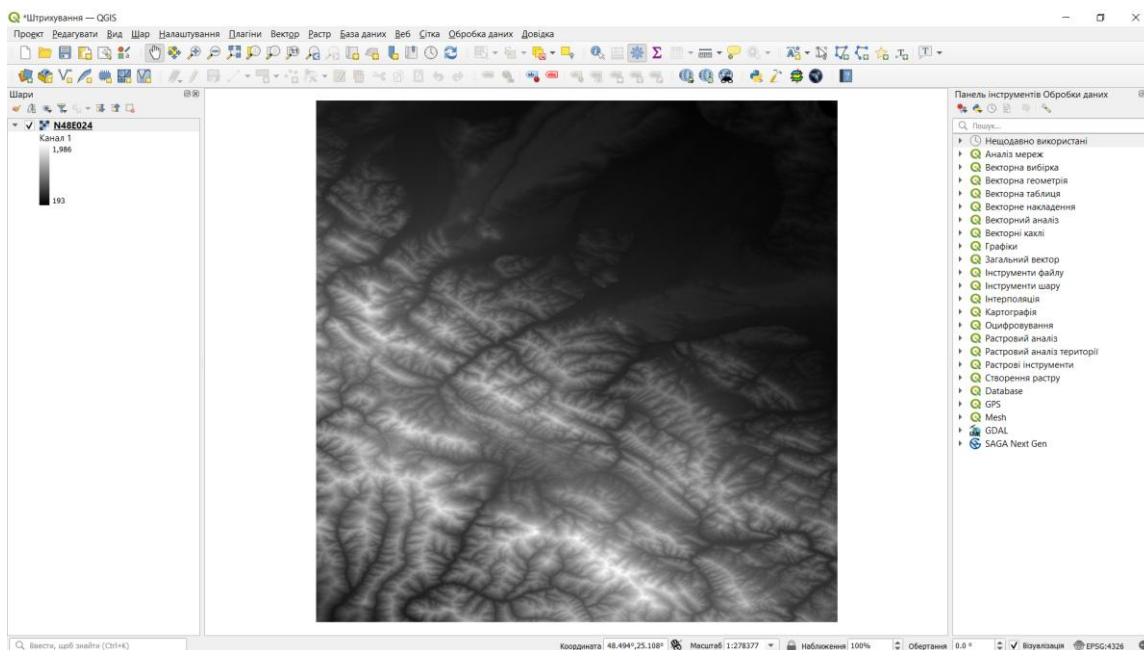


Рис. 3.2.4. Відкрита цифрова модель рельєфу в QGIS

Растрове зображення зараз представлено в географічній системі координат WGS84, тому її необхідно змінити на прямокутну систему координат, що характерна для певної місцевості, так для території України – це УСК-2000, що є державною геодезичною референчною системою координат та застосовується для геодезичних і картографічних робіт. Для території, що обрана для дослідження, а саме гора Говерла та прилеглі до неї території, відповідає система координат УСК-2000 8 зона (UCS-2000 / Ukraine TM zone 8). Щоб перейти до необхідної системи координат, потрібно вибрати меню Растр → Проекції → Перепроєкціювання, та вказати в Цільовій системі координат – прямокутну систему координат, що відповідає цій території. Також у налаштуваннях функції Перепроєкціювання потрібно задати метод інтерполяції для використання, а саме Білінійний, що найкраще підходить для висотних даних, оскільки цей метод є достатньо швидким у реалізації, при цьому не втрачається якість отриманого зображення. Даний метод інтерполяції дає більш згладжений результат, ніж інші методи, зменшуючи кількість спотворень у растрі, що буде отриманим. Також треба обрати папку, куди буде збережений отриманий файл та дати йому назву (рис. 3.2.5). У результаті з'явиться новий растровий шар у потрібній проекції. Ця дія є необхідною для побудови штрихів, якщо її не виконати, то в наступних етапах не вийде створити точки з геометрії через задану кількість метрів, а не за градусами.

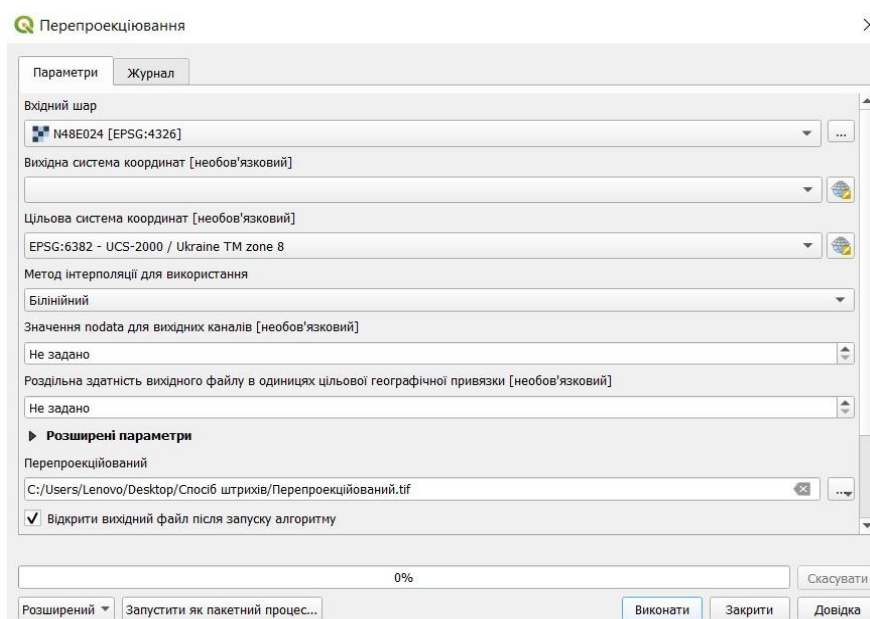


Рис. 3.2.5. Задані параметри інструменту Перепроєкціювання

Далі необхідно вибрати ділянку, за якою будуть побудовані штрихи, так в Українських Карпатах було обрано найвищу гору – Говерлу. Такий вибір пов'язаний зі специфікою алгоритму, що використовується для побудови штрихів, щоб показати як штрихи розташовуються на крутих та пологих схилах. Обравши ділянку необхідно створити шейп-файл, що буде окреслювати межі досліджуваної території, з метою подальшого обрізання растру.

Для того, щоб створити шейп-файл необхідно на панелі інструментів Інструменти диспетчеру джерел даних обрати інструмент Створити шар Sharfile та вказати всі параметри, що необхідні для створення шару, а саме назву файлу та теку, куди буде збережено даний файл, кодування файлу, тип геометрії (точка, мультиточка, лінія або полігон) та проекцію, далі натиснути кнопку ОК. У результаті буде створений шейп-файл. Щоб додати до утвореного файлу дані необхідно увімкнути редагування на панелі інструментів Інструменти оцифрування, на цій же панелі обрати інструмент Додати полігональний об'єкт та окреслити межі досліджуваної області. Після створення об'єкту обов'язково зберегти зміни та вимкнути редагування. У нашому випадку було створено квадрат зі сторонами 4,5 км (рис. 3.2.6).

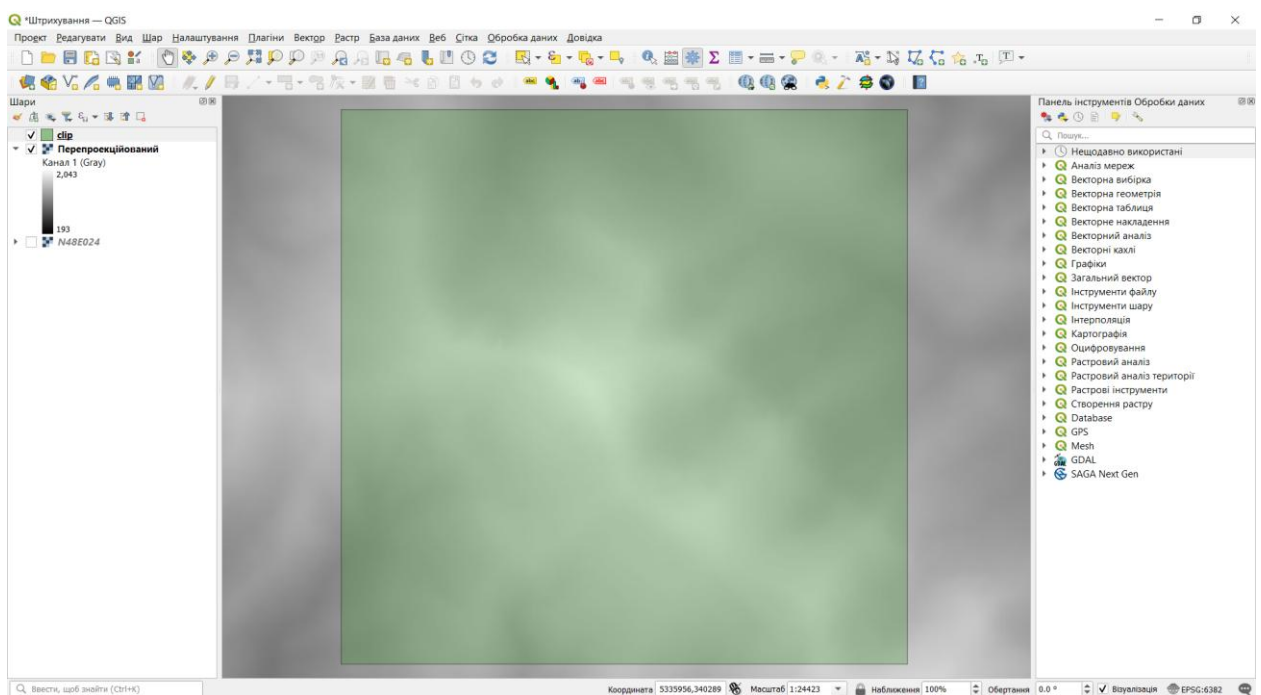


Рис. 3.2.6. Створений шейп-файл досліджуваної ділянки

Цифрова модель рельєфу є досить об'ємною, тобто значно більшою, ніж область, що нас цікавить, оскільки дані SRTM охоплюють достатньо велику територію. Якщо залишити цей растровий знімок без змін, то його обробка буде займати великий проміжок часу. Для цього растр було обрізано до конкретної області, що нас цікавить, по шейп-файлу, який було створено на попередньому кроці. Дана дія проводиться через меню Растр → Вилучення → Вирізати область з растру. У даному інструменті в параметрі вхідний шар обираємо уже перепроєкційований растр, що необхідно обрізати та встановлюємо в параметр Область, що вирізається → Обчислити з шару й обираємо шейп-файл, що був створений на попередньому кроці. Наприкінці усіх параметрів даного інструменту обираємо, в яку папку необхідно зберегти отриманий файл та його назву. Натискаємо команду Виконати (рис. 3.2.7).

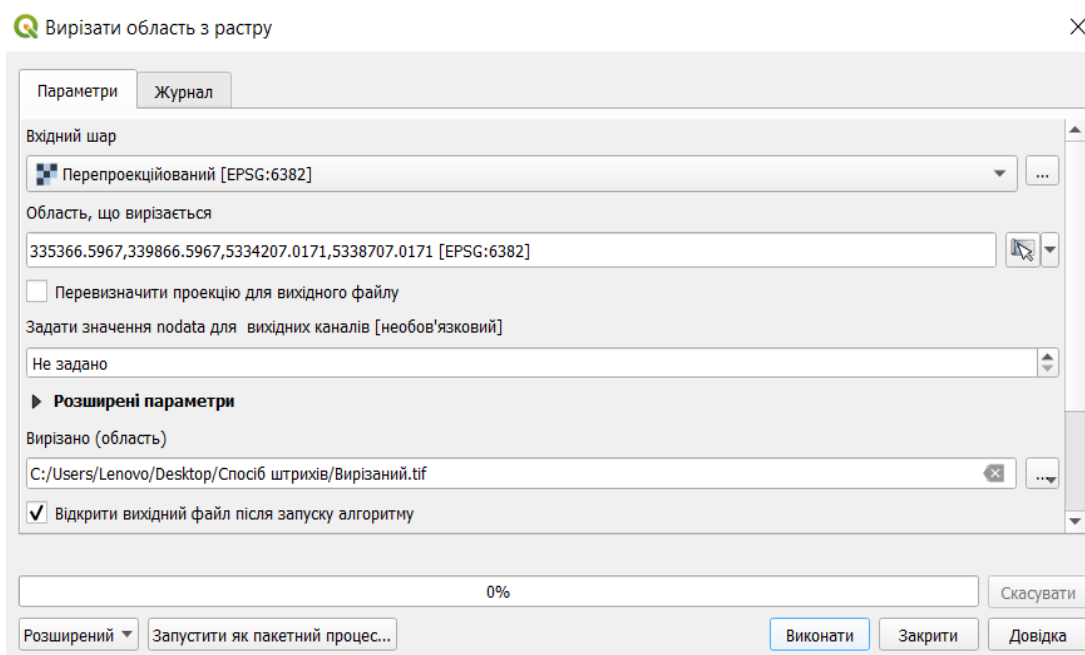


Рис. 3.2.7. Задані параметри інструменту Вирізати область з растру

Після попередньої обробки растру наступним кроком є створення ізоліній, що будуть основою штрихових ліній. Для цього було використано меню Растр → Вилучення → Ізолінія. Для побудови ізоліній даної ЦМР було обрано висоту перерізу рельєфу 10 м, це найбільш оптимальний варіант для даного варіанту, щоб горизонталі підкреслювали форми рельєфу й слугували гарними опорними

лініями для побудови штрихів. В інструменті Ізолінія в параметрі Вхідний шар необхідно обрати Вирізаний, вказати Інтервал між ізолініями – 10 м та вибрати папку для збереження отриманого векторного шару (рис. 3.2.8).

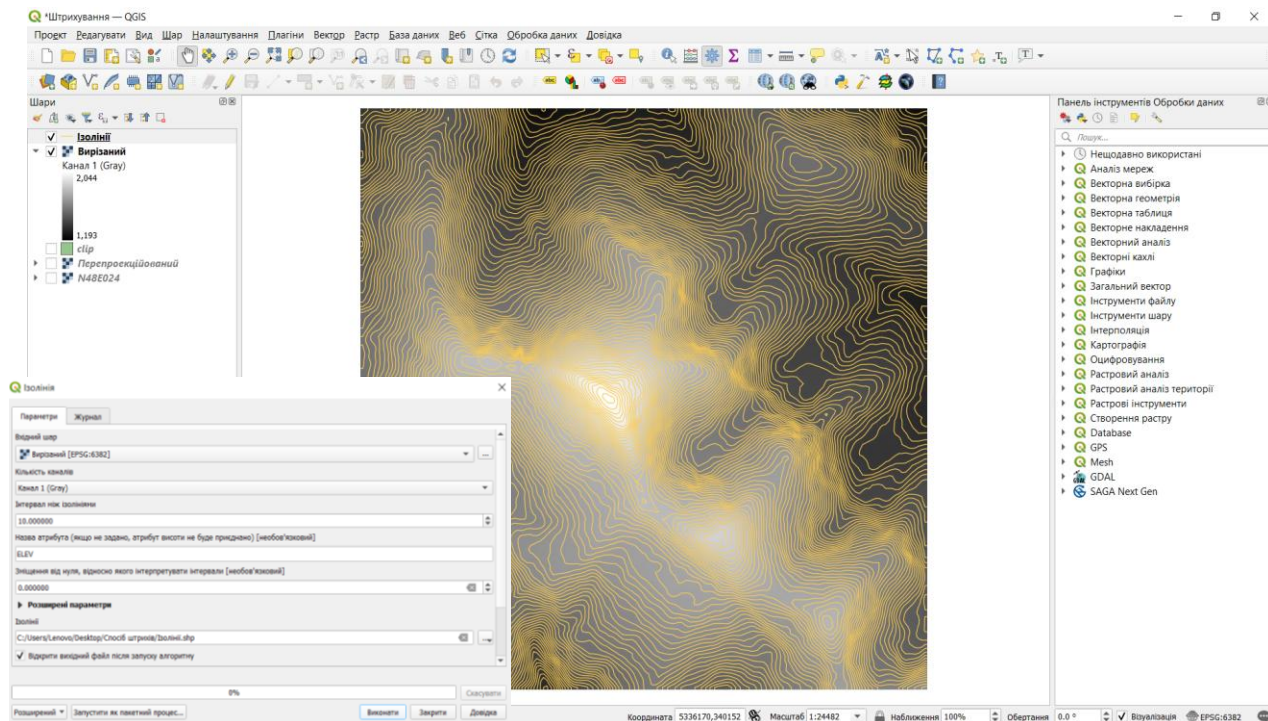


Рис. 3.2.8. Побудовані горизонталі за обрізаним растром

Як можна побачити отримані горизонталі не є плавними, а це може заважати подальшій побудові штрихових ліній, що будуть направлені перпендикулярно ізолініям. Тож для того, щоб уникнути надмірних згибів, було проведено згладжування горизонталей з використанням інструменту Line Smoothing в плагіні Processing Saga NextGen Provider. Даний інструмент надає різні методи згладження ізоліній. Так є метод *iterative averaging (SIA)* і *Gaussian filtering*, різниця між якими полягає у кількості ітерацій та в силі згладжування. Єдиним змінним параметром у випадку побудованих горизонталей для території, що досліджується, є *Sigma*, що вказує ступінь згладжування ліній, вибране значення 3. Також необхідно вказати назву файлу та директорію, куди його буде збережено. Усі інші параметри залишені за замовчуванням (рис. 3.2.9).

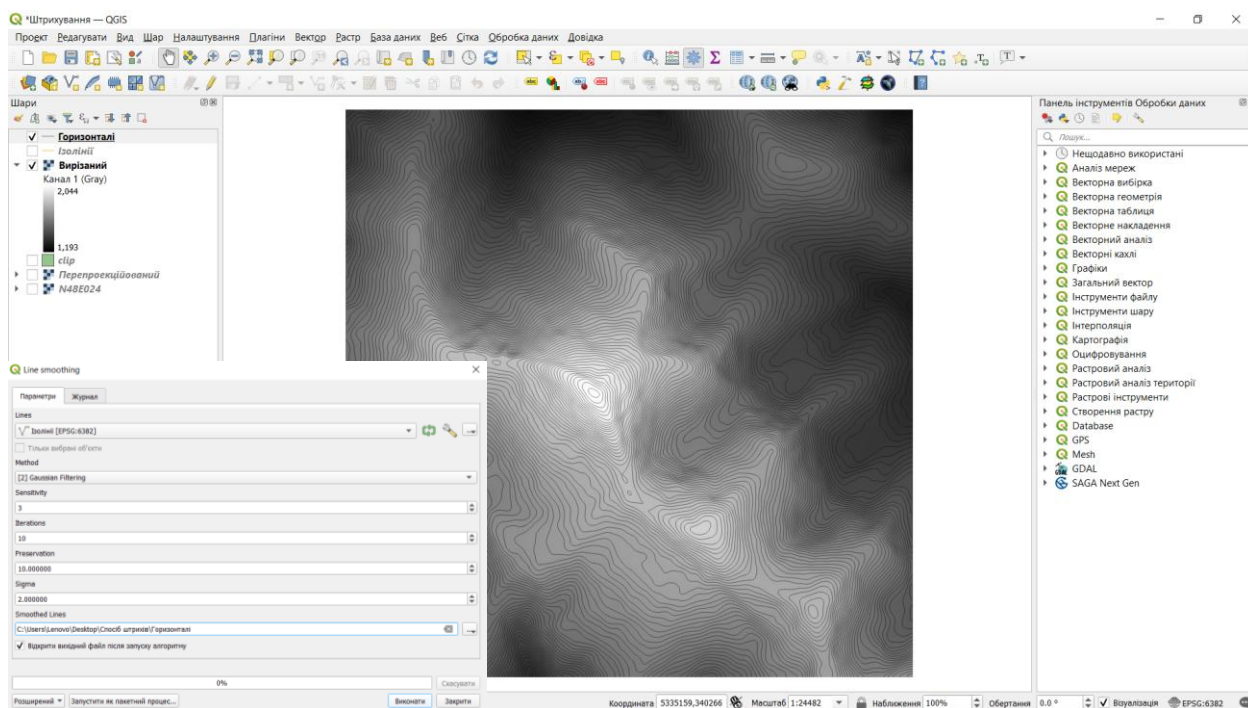


Рис. 3.2.9. Отримані горизонталі в результаті процесу Line Smoothing

Після виконання згладжування горизонталей можна провести їх вибірку, якщо буде досить багато локальних знижень, що можуть заважати побудові штрихів, оскільки маленькі замкнені ділянки будуть відображатися достатньо грубо. Для виконання поставленої дії на панелі інструментів Виділення вибрати інструмент Вибрати об'єкти, використовуючи вираз. У вікні, що з'явилося треба написати вираз, за яким горизонталі, що є меншими за довжину, наприклад, 500 метрів не будуть враховані під час вибірки об'єктів. Тобто написати такий вираз $\$length > 500$, де $\$length$ означає вирахування довжини геометрії лінійного об'єкта, 500 означає довжину горизонталей. Ця дія виконується для того, щоб відфільтрувати горизонталі. Вибрані об'єкти можна експортувати в новий шар. У нашому випадку вибірку проводити не треба, оскільки локальних знижень майже немає. Тож одразу можна перейти до наступної дії.

Після створення файлу ізоліній його необхідно розділити за атрибутивними даними, щоб кожна горизонталь була в окремому шейп-файлі. Для цього було використано інструмент Розділити векторний шар, що знаходиться на панелі інструментів у розділі Загальний вектор. У параметрі даного інструменту необхідно вказати вхідний шар, що буде розділено, тобто шейп-файл

горизонталей, вказати поле унікального ідентифікатора, тобто поле, за яким даний шар буде розділено на декілька інших, так як ми будемо розподіляти горизонталі за висотою, то було обрано поле ELEV. Останнім кроком є вибір типу вихідного файлу, обираємо шейп-файл, після цього вказуємо вихідний каталог та запускаємо виконання даного процесу.

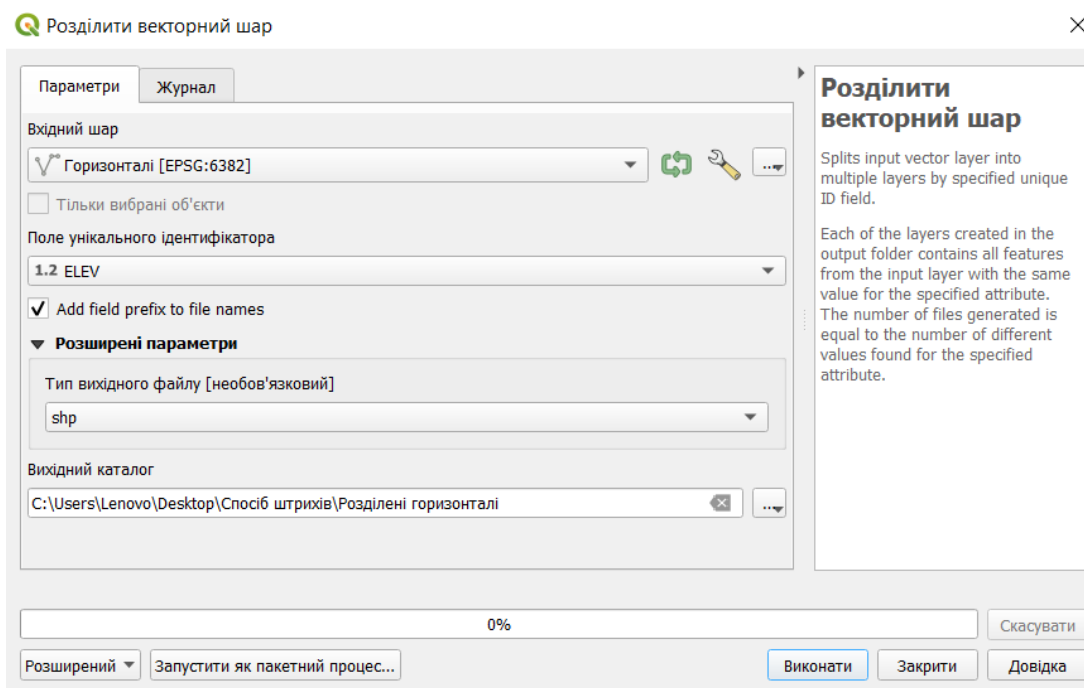


Рис. 3.2.10. Задані параметри інструменту Розділити векторний шар

Після розділення векторного шару Горизонталі, необхідно додати у проєкт усі новоутворені шари. Ця дія виконується через меню Шар → Додати шар → Додати векторний шар. Додаємо горизонталі у проєкт, для послідовної роботи з ними їх можна згрупувати за відповідними значеннями, так горизонталі було згруповано за вершинами, що зустрічаються на даній цифровій моделі рельєфу.

За кожною горизонталлю було створено точки інструментом Точки вздовж геометрії у наборі інструментів Векторна геометрія. Цей побудований векторний шар стане основою для штрихових ліній, оскільки штрихи будуть нанесені на карту саме зі створених точок. У налаштуваннях інструменту потрібно задати відстань між точками, що будуть пролягати вздовж ізоліній, було обрано відстань 10 метрів. У результаті виконання дії на горизонталі з'явилася велика кількість точок (рис. 3.2.11).

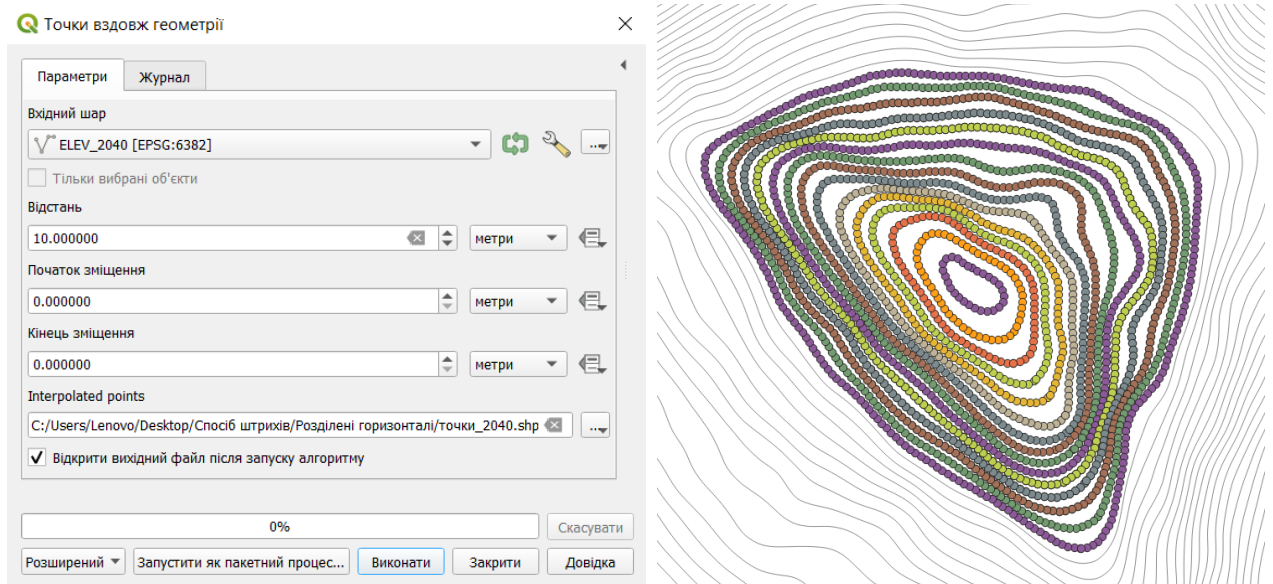


Рис. 3.2.11. Створення точкового векторного шару вздовж ізоліній

У результаті ми можемо побачити утворення нового точкового шару. Саме з цим шаром ми будемо працювати, щоб створити лінії штрихів. Для реалізації способу штрихування було використано символіку нового утвореного шару, а саме зміну типу шару з Simple Marker на Geometry Generator (рис. 3.2.12) та обрано тип геометрії Лінія/Мультилінія. Дана дія відкриє можливість роботи над візуалізацією отриманих точок, щоб з них утворити штрихові лінії.

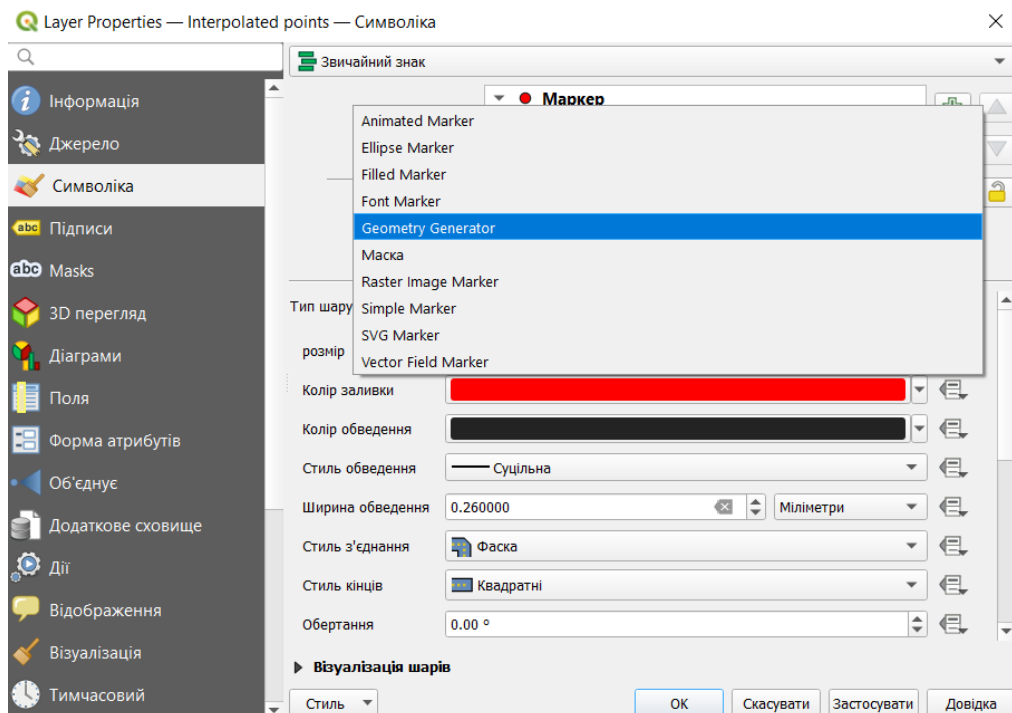


Рис. 3.2.12. Зміна типу шару з Simple Marker на Geometry Generator

Текстове поле, яке містить \$geometry, служить для визначення геометрії в QGIS. Змінна \$geometry вказує на вихідну геометрію шару, і вона застосовується до кожної вибраної точки. Наступним кроком стала заміна \$geometry на вираз, завдяки якому буде побудовано штрихові лінії (рис. 3.2.13).

Діалогове вікно виразу

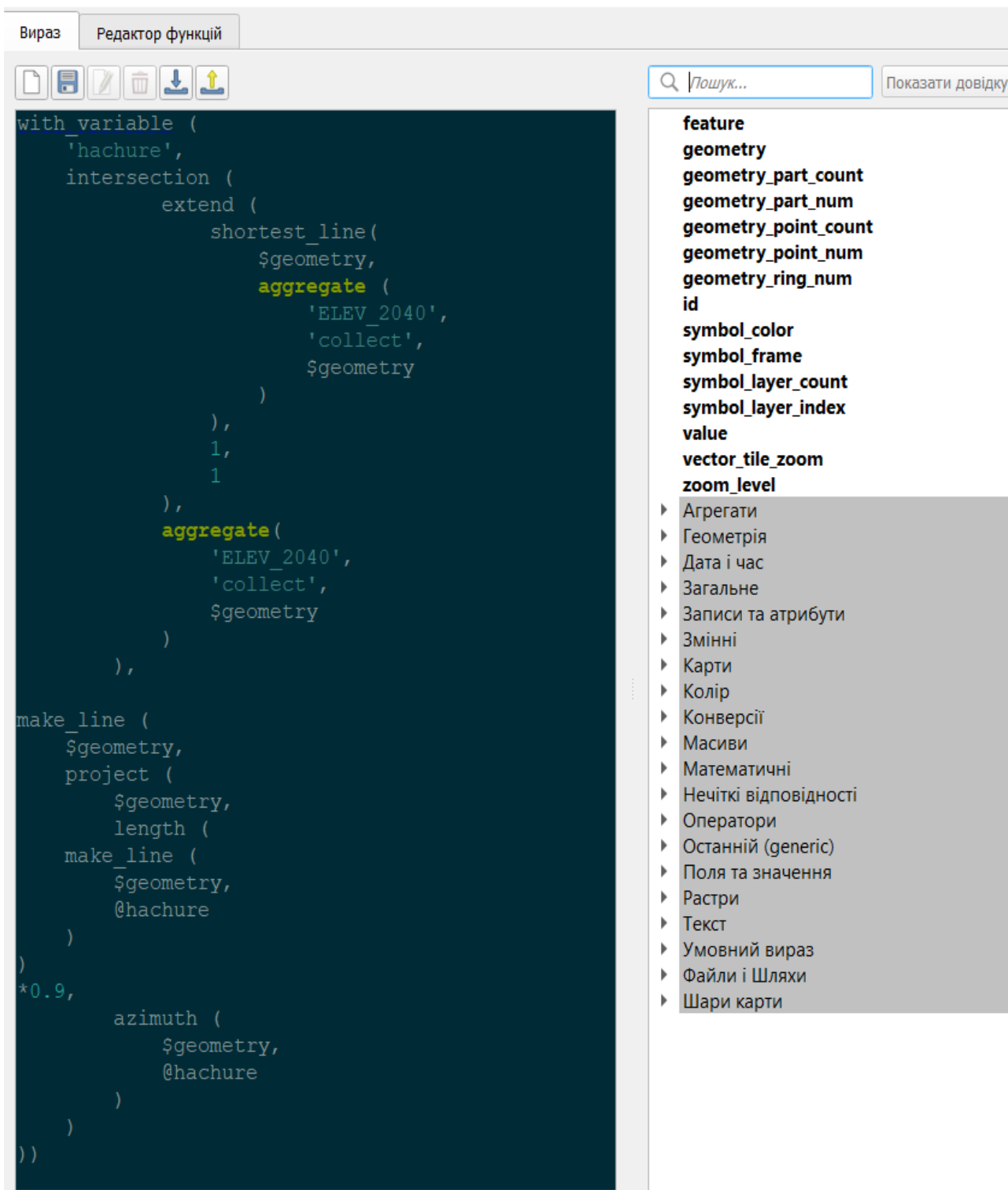


Рис. 3.2.13. Вираз для створення штрихових ліній

Давайте розглянемо даний вираз для точок вздовж горизонталі ELEV_2030 послідовно. Тож перше, що необхідно було зробити – це використати функцію *with_variable*, що в QGIS використовується для створення змінної. У даному випадку, було створено змінну з ім'ям *'hachure'*. Після ключового слова *with_variable* йде вираз, що буде обчислено та збережено в змінній *'hachure'*. Вираз починається з *Intersection ()* – ця функція знаходить точки перетину між двома геометричними об'єктами. Всередині даної функції використовуються функції *extend* з метою розширення ліній, що отримані з *shortest_line*, на одну одиницю в обидві сторони. Функція *shortest_line* знаходить найкоротшу відстань між точкою геометрії та найближчою точкою на горизонталі. Потім використовується функція *aggregate*, що дозволяє обчислити та поєднати між собою точки та горизонталь, що є вищою на 10 метрів (ELEV_2040).

Наступною функцією у даному виразі є створення лінії *make_line()* між двома точками, а саме вихідної точки вздовж геометрії (*\$geometry*) і точкою, що отримана шляхом проєкціювання даної точки на горизонталь ELEV_2040 у змінній *'hachure'*. Всередині функції *project* вказується довжина (*length*), що обчислена як дев'ята частина довжини лінії між поточною точкою та точкою зі змінною *@hachure* і азимут (*azimuth*), що обчислений як напрямок від поточної точки до точки зі змінної *@hachure*). Такий алгоритм повторно використовуємо для кожної горизонталі для того, щоб створити штрихування.

Потрібно сказати й про недоліки побудови штрихування даним алгоритмом. Однією з досить частих проблем була відсутність штрихових ліній в лощинах, оскільки за виразом для створення ліній між горизонталями обирається найкоротша відстань, тому вони зосереджувалися дуже щільно один до одного, при цьому не заповнюючи простір даної форми рельєфу. У такому випадку було використано панель інструментів Робота з анотаціями → Створення лінійної анотації та вручну нанесено штрихи, як вони повинні заповнювати дану форму рельєфу. Також даний алгоритм потребує ручного нанесення штрихування у сідловинах.

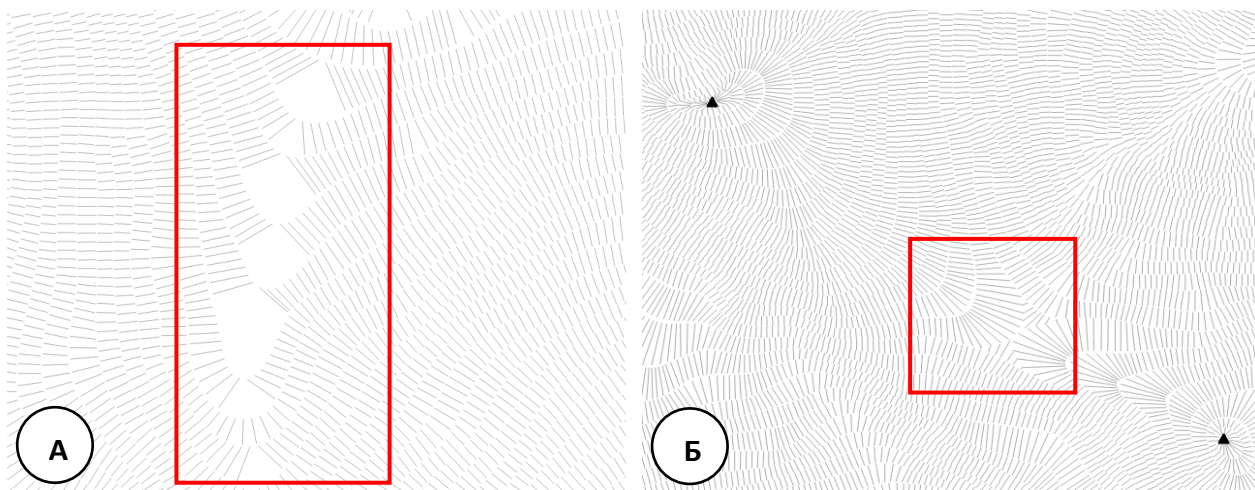


Рис. 3.2.14. Ділянки, що потребують нанесення штрихування власноруч: А – незаповнена штрихування лощина, Б – сідловину з нанесеними власноруч лінійними анотаціями

У результаті виконання даного алгоритму можна побачити, що вийшло справді щось схоже на штрихи (рис. 3.2.15). Звичайно це не ті штрихи, що ми можемо побачити на шкалі Лемана, бо для реалізації такого способу потрібна вже більш детальна робота, а саме програмування, створення коду та створення відповідного плагіну. Але головною задачею було створити актуальний й водночас доступний для всіх алгоритм зі створення штрихових ліній. На мою думку, розроблений алгоритм відповідає поставленій задачі.

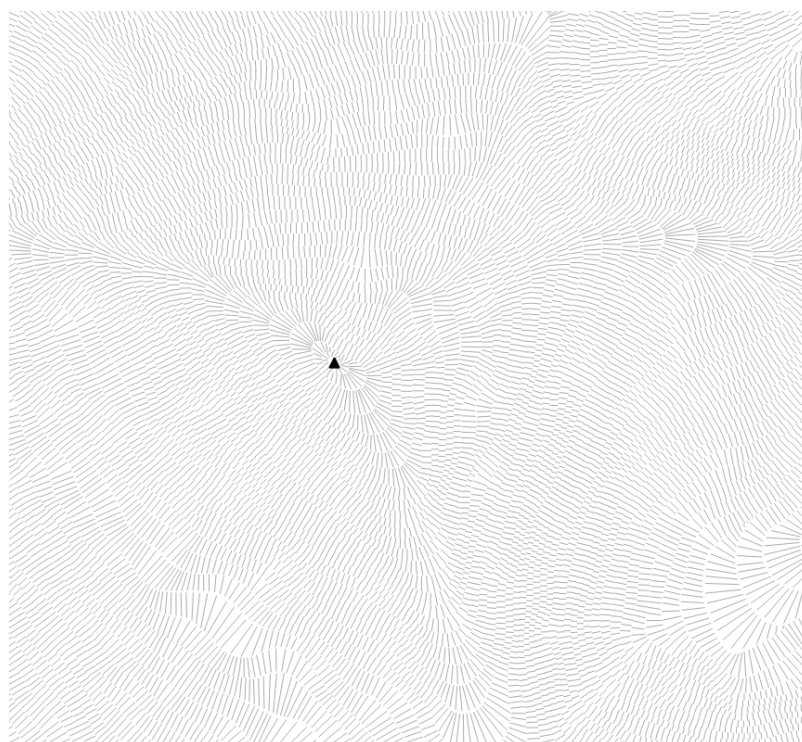


Рис. 3.2.15. Штрихування гори Говерли

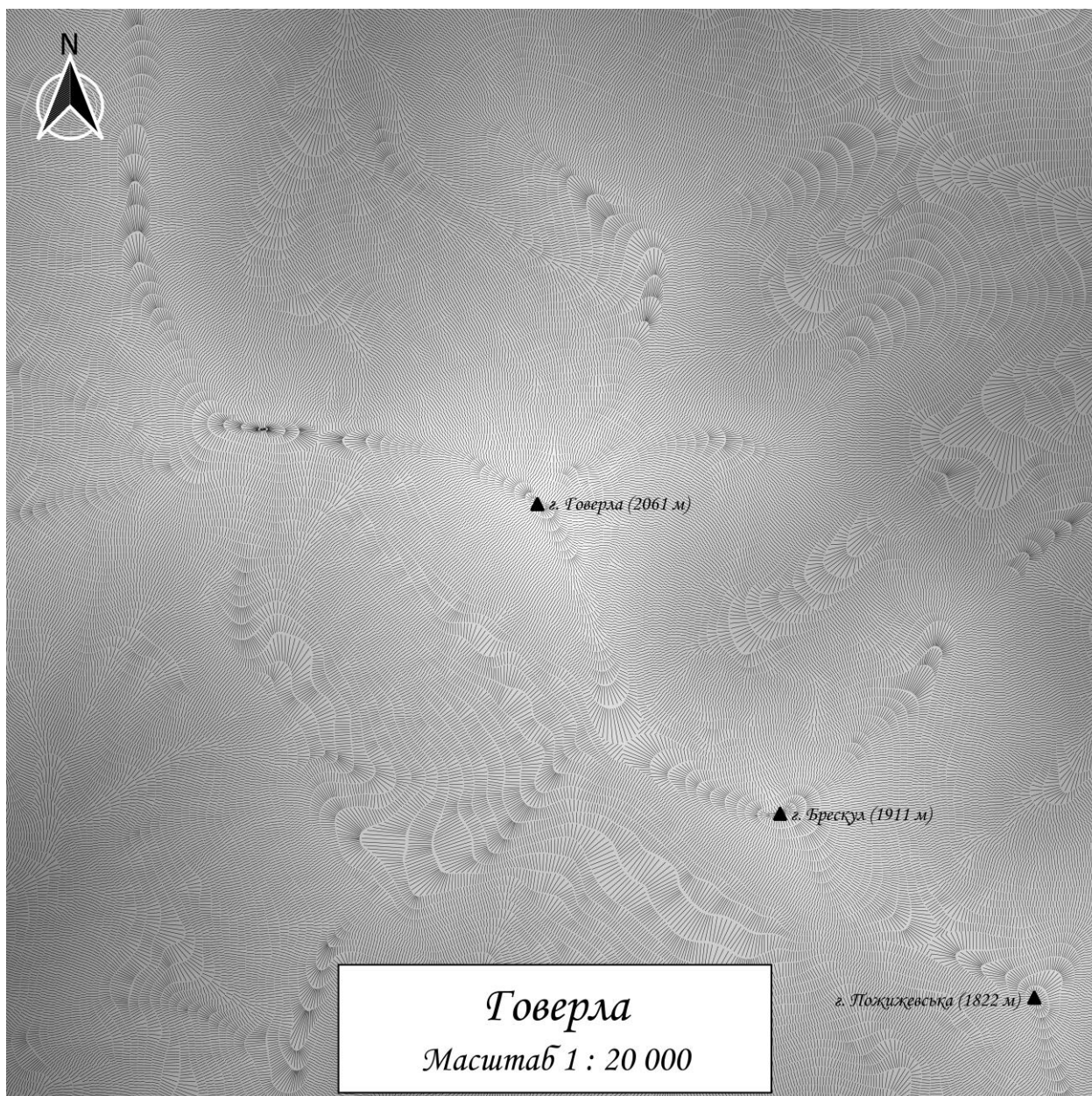


Рис. 3.2.16. Створений спосіб штрихування
гори Говерли та прилеглих територій

Процес створення методу штрихування по істині унікальний, його реалізація в традиційному картографуванні наскільки ідеальна, що її майже неможливо відтворити в геоінформаційному картографуванні не використовуючи програмування. Алгоритм, що представлений вище повністю не здатен відобразити ту вишуканість методу штрихування, що представлена на картах XVII – XVIII століть, але він наближений до нього.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі бакалавра було розглянуто способи зображення рельєфу в традиційному та геоінформаційному картографуванні, створено алгоритм побудови способу штрихування. Для цього було використано велику кількість наукових статей, картографічних і літературних джерел, щоб повністю розглянути, а як же відбувався розвиток картографування рельєфу на певному етапі.

На основі цього дослідження було отримано такі результати:

1. Проведено детальний аналіз наукових публікацій, що стосуються способів зображення рельєфу. Було розглянуто історію становлення та розвитку різних способів зображення рельєфу. Вивчення саме історичних аспектів дозволяє зрозуміти, як формувалася й еволюціонував певний спосіб зображення рельєфу в залежності від розвитку приладів і технологій, а це підкреслює актуальність дослідження у цьому напрямку на сучасному технологічному рівні. У традиційному картографуванні виділено три найголовніші етапи розвитку способів зображення рельєфу: найперші, що були простими за своїм відображенням; ті, які виникли зі збільшенням вимог до укладання карти на планіметрично правильній основі; інноваційні, що формувалися у ХХ столітті.

2. Описано процес картографування рельєфу з появою та розвитком геоінформаційних систем. Виявлено, що впровадження геоінформаційних систем на початковому етапі становлення не розглядалося у картографуванні рельєфу, оскільки вважалося, що комп'ютери не можуть передати ні графічну, ні естетичну складову при створенні карт. Показано, що з розвитком геоінформаційних технологій усвідомлювалася все більше їх перевага над традиційним картографуванням, оскільки ці технології покращили точність та детальність картографічного зображення, що в результаті призвело до широкого поширення геоінформаційних систем.

3. Досліджено сучасний стан розвитку геоінформаційних технологій для відображення рельєфу. Було встановлено, що сучасні технології дозволяють створювати картографічне зображення рельєфу високої точності й деталізації за достатньо короткий проміжок часу, що неможливо було досягти у минулому. Для доказу переваг геоінформаційного картографування створено карту рельєфу Харківської області на основі цифрової моделі рельєфу. Оцінено перспективи майбутнього розвитку геоінформаційних технологій: покращення роздільної здатності, динамічна візуалізація, інтеграція геоінформаційних систем зі штучним інтелектом, використання віртуальної та доповненої реальності.

4. Виявлено ключові відмінності між традиційним та геоінформаційним картографуванням рельєфу. Традиційне є достатньо складним, оскільки базується на ручній обробці даних, вимагає достатньо великої уваги до дрібних деталей, натомість геоінформаційне дозволяє створювати більш точне відображення, використовуючи процеси автоматизації. Зараз майже всі способи зображення рельєфу автоматизовані в геоінформаційному картографуванні.

5. Розроблено доступний алгоритм створення картографічного зображення рельєфу способом штрихування. Описано процес створення штрихування в геоінформаційній системі QGIS з використанням цифрової моделі рельєфу.

Усі постановлені задачі були повністю вирішені, забезпечивши комплексний огляд історії розвитку способів зображення рельєфу, їх сучасний стан розвитку з використанням геоінформаційних технологій, виявлено відмінності між традиційними ручними та сучасними геоінформаційними автоматизованими методами створення карт, розроблено й успішно реалізовано алгоритм побудови способу штрихування в геоінформаційній системі QGIS.

Отримані результати можуть мати велике значення в освіті, оскільки дане дослідження є гарною методологічною базою для вивчення способів зображення рельєфу та розробки нових методів картографування рельєфу; у містобудуванні, тому що надає можливість аналізувати рельєф території; у картографії, для аналізу різних способів зображення рельєфу, їх практичної реалізації.

Соціальна значущість цього дослідження полягає у тому, що точні карти рельєфу дозволять ефективніше відображати особливості земної поверхні, сприяти кращому плануванню території, а це має прямий вплив на життя населення. Науково-теоретичне значення роботи полягає у доповненні існуючих праць щодо способів зображення рельєфу, розкритті питання розвитку картографування рельєфу під час становлення геоінформаційних систем. Практична значущість дослідження – це розроблений алгоритм побудови способу штрихування, що є актуальним та доступним, і який можна застосовувати для покращення картографічних зображень у геоінформаційній системі QGIS. Це дозволить підвищити рівень оформлення карт – легке сприйняття зображення рельєфу, краща виразність, більша наочність.

До подальших перспектив роботи над цією темою належить удосконалення алгоритму створення штрихування, застосування різної товщини та кольору для візуалізації штрихів залежно від експозиції та кутів нахилу схилів. До перспектив також належить більш поглиблене дослідження способів зображення рельєфу, детальний аналіз історії появи та розвитку кожного способу, і їх можливість відтворення у геоінформаційному картографуванні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Божок А. П., Осауленко Л. Є., Пастух В. В. Картографія : підручник. Київ : Фітосоціоцентр, 1999. 252 с.
2. Зацерковний В. І., Бурачек В. Г., Железняк О. О., Терещенко А. О. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. 492 с.
3. Костріков С. В., Черваньов І. Г. Дослідження самоорганізації флювіального рельєфу на засадах синергетичної парадигми сучасного природознавства : монографія. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2010. 144 с.
4. Ліодт Г. М. Картознавство. Київ : Радянська школа, 1951. 404 с.
5. Луцанова А. М. Особливості створення та візуалізації 3D моделей рельєфу за допомогою сучасних програмних продуктів. *Часопис картографії* : зб. наук. праць. Київ, 2013. Вип. 7. С. 44–52.
6. Нестерчук І. К. Зображення рельєфу на картах. *Часопис картографії* : зб. наук. праць. Київ, 2013. Вип. 6. С. 15–25. URL : http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/4636/3/ChK_2013_6_15-25.pdf. Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 15.03.2023).
7. Орещенко А. В. Рельєф як головний компонент тривимірних реалістичних картографічних моделей. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ, 2009. Вип. 24. С. 305–309.
8. Пересадько В. А. Картографічне забезпечення екологічних досліджень і охорони природи : монографія. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2009. 242 с.
9. Пересадько В. А., Онищенко А. В., Браславська О. В., Попов В. С. Екскурс в історію зображення рельєфу на географічних картах. Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. 2022. Вип. 36. С. 13–22. URL : <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/23218/21260>. Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 03.03.2024).

10. Пілічева М. О., Попик Н. В. Геоінформаційні технології автоматизації побудови рельєфу та ухилів місцевості для землевпорядних потреб. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : технічні науки. 2018. Т. 29(68), № 6(2). С. 217–221. URL : http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/6_2018/part_2/42.pdf.

Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 04.05.2022).

11. Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування : Постанова від 4 вересня 2013 р. / Кабінет Міністрів України. Київ : Парлам. вид-во, 2013. 7 с. (Бібліотека офіційних видань).

12. Свідзінська Д. В. Оцінка придатності цифрових моделей висот SRTM та ASTER для цілей гідрологічного геопросторового аналізу. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2014 Вип. 19. С. 88–92.

13. Стецюк В. В., Ковальчук І. П. Основи геоморфології : навчальний посібник / за ред. О. М. Маринича. Київ : Вища школа, 2005. 495 с.

14. Черваньов І. Г., Попов В. С. Досвід застосування ГІС-технологій для автоматичного аналізу морфології рельєфу за даними радарного знімання. *Український географічний журнал*. 2020. № 3. С. 13–20.

15. Buchin K., Costa Sousa M., Döllner J., Samavati F., Walther M. Illustrating terrains using direction of slope and lighting. *In 4th ICA Mountain Cartography Workshop*. 2004. P. 259–269. URL : https://mountaincartography.icaci.org/publications/papers/papers_nuria_04/buchin.pdf. Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 01.03.2024).

16. Evans I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? *Geomorphology*. 2012. № 137. P. 94–106.

17. Gao Jun, You Xiong. The Application of Virtual Reality on Military Mapping and Training Simulation. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*. 1996.

18. Gao Jun. The New Way of Battlefield Spatial Cognition Virtual Reality and Mapping Safeguard. *Military Mapping*. 1994.

19. Imhof E. Cartographic relief presentation. Berlin, 1965. 389 p.
20. Jenny B. An interactive approach to analytical relief shading. *Cartographica*. 2001. № 2. P. 67–75.
21. Jenny B., Hurni L. Swiss-style colour relief shading modulated by elevation and by exposure to illumination. *The Cartographic Journal*. 2006. № 3. P. 198–207.
22. Kennelly P. J. Hillshading with oriented halftones. *Cartographic Perspectives*. 2002. 43. P. 25–42. URL : <https://www.mbm.gatech.edu/pdf/gis-half-tone.pdf>. Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 07.11.2023).
23. Kennelly P. J., Kimerling A. J. Desktop hachure maps from digital elevation models. *Cartographic Perspectives*. 37. P. 78–81. URL : <https://cartographicperspectives.org/index.php/journal/article/view/cp37-kennelly-kimerling/pdf>. Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 26.10.2023).
24. Nighbert J. Creating beautiful «painted relief» using ArcInfo. *Esri.com*. 1995. URL : <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc98/PROCEED/TO850/PAP842/P842.HTM>. Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 15.03.2023).
25. Robert E. Roth, Donohue Richard G. A Process for Keeping Pace with Evolving Web Mapping Technologies. *Cartographic Perspectives*. Milwaukee, 2014. № 78. p. 25–78.
26. Samsonov T. Topographic hachures in QGIS. 12th ICA Mountain Cartography Workshop. 2023. URL : https://mountaincartography.icaci.org/activities/workshops/colorado_usa/presentations/Samsonov.pdf. Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 01.03.2024).
27. Yoeli P. Topographical relief depiction by hachures with computer and plotter. *Cartographic Journal*. 1985. 22. P. 111–124. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/caj.1985.22.2.111>. Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 25.10.2023).
28. Zentai L. The transformation of relief representation on topographic maps in Hungary: from hachures to contour lines. *The Cartographic Journal*. 2018. Vol. 55. P.

150–158. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00087041.2018.1433475?src=recsys>. Електрон. версія друк. публікації (дата звернення : 25.10.2023).

29. Изображение рельефа по принципу отвесного и косого освещения. Штрихи. Отмывка : веб-сайт. URL : <https://studfile.net/preview/7709790/page:27/> (дата звернення : 02.06.2023).

30. Карти триверстові : веб-сайт. URL : <http://freemap.com.ua/karty-ukrainy/karty-trexverstovki-s-privyazkoj-dlya-gps> (дата звернення : 12.06.2023).

31. Способи та сутність зображення рельєфу : веб-сайт. URL : https://stud.com.ua/71718/bzhd/sposobi_sutnist_zobrazhennya_relyefu (дата звернення : 10.06.2023).

32. 1590 map of the Black Sea region. *Pinterest* : веб-сайт. URL : <https://cz.pinterest.com/pin/854346991800415489/> (дата звернення : 12.06.2023).

33. 1781 – France minéralogique, Dupain-Triel. *Histoire et traditions du bassin D'arcachon* : веб-сайт. URL : <https://htba.fr/1781-france-mineralogique-dupain-triel-trace-de-la-leyre-bassin-darcachon-inexistant/> (дата звернення : 03.11.2023).

34. A beginners guide to understanding map contour lines. *Ordnance Survey* : веб-сайт. URL : <https://getoutside.ordnancesurvey.co.uk/guides/understanding-map-contour-lines-for-beginners/> (дата звернення : 03.11.2023).

35. A map of the Valdichiana *Royal Collection Trust* : веб-сайт. URL : <https://www.rct.uk/collection/912278/a-map-of-the-valdichiana> (дата звернення : 12.06.2023).

36. A portion of Tanaka's illuminated contour map of the Kirishima volcanic group near Kagoshima in Kyushu, Japan : веб-сайт. URL : https://www.researchgate.net/figure/A-portion-of-Tanakas-illuminated-contour-map-of-the-Kirishima-volcanic-group-near_fig7_290297090 (дата звернення : 12.06.2023).

37. Chain of Custody. *The Great Lines* : веб-сайт. URL : <https://thegreatlinesproject.wordpress.com/2016/07/04/chain-of-custody/> (дата звернення : 03.11.2023).

38. Changing length of Shortest_Line for CAD-like slope pattern using QGIS. *Stack Exchange* : веб-сайт. URL : <https://gis.stackexchange.com/questions/386102/changing-length-of-shortest-line-for-cad-like-slope-pattern-using-qgis> (дата звернення : 10.10.2023).

39. Depicting the Landscape. *Cartographic Symbolologies* : веб-сайт. URL : <https://exhibits.stanford.edu/cartosym/feature/depicting-the-landscape> (дата звернення : 03.11.2023).

40. Dufour Map. *Federal Office of Topography swisstopo* : веб-сайт. URL : <https://www.swisstopo.admin.ch/en/dufour-map> (дата звернення : 06.06.2023).

41. Earthdata Search. *Earthdata* : веб-сайт. URL : [https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=s&sp\[0\]=24.48633%2C48.14815&fi=SRTM&lat=48.50227965802055&long=23.20751953125&zoom=7](https://search.earthdata.nasa.gov/search?q=s&sp[0]=24.48633%2C48.14815&fi=SRTM&lat=48.50227965802055&long=23.20751953125&zoom=7) (дата звернення 10.03.2024).

42. Eduard Imhof working on the Windgällen relief 1938 : веб-сайт. URL : <https://nl.pinterest.com/pin/159244536798862084/> (дата звернення : 12.06.2023).

43. Evolution of Geographic Information Systems (GISs) : веб-сайт. URL : <https://subscription.packtpub.com/book/programming/9781837639175/2/ch021vl1sec06/evolution-of-geographic-information-systems-giss> (дата звернення : 01.06.2023).

44. Natchure style for ArcGIS Pro. *ArcGIS* : веб-сайт. URL : <https://esri-styles.maps.arcgis.com/home/item.html?id=87abe491604e45629e562903450947b7> (дата звернення : 08.01.2024).

45. Hans Conrad Gyger. *Wikipedia* : веб-сайт. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Hans_Conrad_Gyger (дата звернення : 12.06.2023).

46. Hillshading with oriented halftones. *ResearchGate* : веб-сайт. URL : <https://www.researchgate.net/figure/A-portion-of-a-large-scale-topographic-map->

[using-obliquely-illuminated-hachures-to_fig1_274060140](#) (дата звернення : 25.10.2023). Штрихування

47. History of GIS. *ESRI* : веб-сайт. URL : <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/history-of-gis> (дата звернення : 01.06.2023).

48. History relief shading. *Relief shading* : веб-сайт. URL : <http://www.reliefshading.com/history/> (дата звернення : 10.06.2023).

49. How to create a tasty monochrome hachure map in QGIS. *Robin Hawkes* : веб-сайт. URL : <https://robinhawkes.com/blog/qgis-monochrome-hachures/> (дата звернення : 10.10.2023).

50. Ignaziodanti sizilien. *Wikipedia* : веб-сайт. URL : https://ru.m.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Ignaziodanti_sizilien.jpg (дата звернення : 12.06.2023).

51. Map of the river Merwede by Cruquius. *Special Collections* : веб-сайт. URL : <https://www.uu.nl/en/special-collections/collections/maps-and-atlases/regional-maps/map-of-the-river-merwede-by-cruquius> (дата звернення : 03.11.2023).

52. Мапа 1934 ~ Suíça. *eBay.Inc* : веб-сайт. URL : https://www.ebay.com/itm/1934-MAP-SWITZERLAND-THE-ALPS-ITALY-LAND-HEIGHTS-/161828863137?_ul=BR (дата звернення : 12.06.2023).

53. Potentiality of high-resolution topographic survey using unmanned aerial vehicle in Bangladesh. *ScienceDirect* : веб-сайт. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352938522000374> (дата звернення : 03.11.2023).

54. Pundtner Grentzen. (to accompany) Atlas Curieux oder Neuer und Compendieuser Atlas. Internet Archive : веб-сайт. URL : https://archive.org/details/dr_pundtner-grentzen-to-accompany-atlas-curieux-oder-neuer-und-compendieuse-11170043 (дата звернення : 12.06.2023).

55. Reliefkartor i QGIS – Hachures. *Geosupportsystem* : веб-сайт. URL : <https://geosupportsystem.se/2019/07/01/reliefkartor-i-qgis-hachures/> (дата звернення : 10.10.2023).

56. Shaded Relief Archive : веб-сайт. URL : https://www.shadedreliefarchive.com/Graubunden_SW.html (дата звернення : 12.06.2023).

57. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). *NASA* : веб-сайт. URL : <https://eosps0.gsfc.nasa.gov/missions/shuttle-radar-topography-mission> (дата звернення 10.03.2024).

58. SRTM 90m DEM Digital Elevation Database : веб-сайт. URL : <https://srtm.csi.cgiar.org/> (дата звернення : 14.09.2023).

59. Steal this Hachure Style for Pro. *ArcGIS Blog* : веб-сайт. URL : <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-pro/mapping/steal-this-hachure-style-for-pro-please/> (дата звернення : 08.01.2024).

60. Stock Photo – The first topographical map, showing contours of equal elevation, 1782: Marcellin du Carla-Boniface. *Agefotostock* : веб-сайт. URL : <https://www.agefotostock.com/age/en/details-photo/the-first-topographical-map-showing-contours-of-equal-elevation-1782-marcellin-du-carla-boniface/MPN-329189> (дата звернення : 03.11.2023).

61. Terrain Representation : веб-сайт. URL : <https://gistbok.ucgis.org/bok-topics/2020-quarter-03/terrain-representation> (дата звернення : 03.07.2023).

62. The history of Geographic Information Systems (GIS). BCS, The Chartered Institute for IT : веб-сайт. URL : <https://www.bcs.org/articles-opinion-and-research/the-history-of-geographic-information-systems-gis/> (дата звернення : 11.03.2024).

63. The Remarkable History of GIS. *GISGeography* : веб-сайт. URL : <https://gisgeography.com/history-of-gis/> (дата звернення : 11.03.2024).

64. UAVS for a complete topographic survey. *ResearchGate* : веб-сайт. URL https://www.researchgate.net/publication/360958628_UAVS_FOR_A_COMPLETE_TOPOGRAPHIC_SURVEY (дата звернення : 03.11.2023).

65. Visualisierung von Wissen – Kartographie. Allgemeinwissen und Gesellschaft : веб-сайт. URL : <http://www.enzyklopaedie.ch/dokumente/geographica.html> (дата звернення : 05.09.2023).

66. Whitebox-tools topographic_hachures. *GitHub* : веб-сайт. URL : https://github.com/jblindsay/whitebox-tools/blob/master/whitebox-tools-app/src/tools/terrain_analysis/topographic_hachures.rs (дата звернення : 10.10.2023).

67. Yeryüzü Şekillerinin Haritalara Aktarılması Nasıl Yapılır? *Coğrafya Bilimi* : веб-сайт. URL : <https://cografyabilim.net/2017/10/06/yeryuzu-sekillerinin-haritalara-aktarilmasi-nasil-yapilir/> (дата звернення : 25.10.2023).