

Міністерство освіти і науки України
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Географічний факультет
Кафедра географії України та регіоналістики

**СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ
ПОРЯДКІВ РІЧОК ТА ЇХ БАСЕЙНІВ У ЗАСТОСУВАННІ
ДО ВЕРХНЬОГО ПРУТУ ТА ВЕРХНЬОГО СІРЕТУ**

Дипломна робота
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Виконав:
здобувач 2 курсу, групи 617,
спеціальності 103 «Науки про Землю»
ОП «Гідрологія»
Ігонькін Дмитро Іванович
Керівник: проф. Ющенко Ю.С.

До захисту допущено:

Протокол засідання кафедри № 20

від „11” ГРУДНЯ 2023р.

зав. кафедри  проф. Косташук І.І.

Чернівці – 2023

АНОТАЦІЯ

Ігонькін Дмитро Іванович

*Здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти
галузі знань 10 – Природничі науки, спеціальності 103 – Науки про Землю,
ОПП «Гідрологія»
кафедри географії України та регіоналістики
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича,
м. Чернівці, Україна*

СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОРЯДКІВ РІЧОК ТА ЇХ БАСЕЙНІВ У ЗАСТОСУВАННІ ДО ВЕРХНЬОГО ПРУТУ ТА ВЕРХНЬОГО СІРЕТУ

Анотація. Дана дипломна робота присвячена дослідженню порядкової структури за допомогою комп'ютерних технологій. За приклад взято річки Прут та Сірет з їхніми притоками у межах України. Основною метою роботи є дослідження порядкової структури річкових систем, із застосуванням методу комп'ютерного моделювання, використовуючи дані про рельєф, отримані з супутника. Завдяки використанню супутникових даних, будується детальна комп'ютерна модель рельєфу та річкових систем. Дане дослідження дає цінну інформацію про ієрархічну організацію річкових систем, демонструючи можливості застосування методології комп'ютерного моделювання для розуміння складності цих природних утворень.

Ключові слова: порядкова структура, QGis, Strahler order, площа басейну.

ABSTRACT

Igonkin Dmytro Ivanovich

*Applicant of the second (master's) degree of higher education in the field of knowledge 10 – Natural sciences, specialty 103 – Earth sciences, educational program «Hydrology»
of the Department of Geography of Ukraine and Regional Studies
at the Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine*

MODERN METHODS OF DETERMINING THE ORDERS OF RIVERS AND THEIR BASINS IN APPLICATION TO THE UPPER PRUT AND UPPER SIRET

Abstract. The purpose of the work is categorization and description of the existing hydrological databases, demonstration of the hydrological data usage. The research subject is usage of hydrological data for the purpose of hydrological and climatic modeling. Main focus of the research is kept around various databases containing hydrological information. The main methods, which were used in the research, is the method of statistical analysis of the hydrological data, as well as data conversion method, called ETL. The research studies methods of data collection and data persistence for later practical use, as well as hydrological data digitalization and standardization methods.

Keywords: database, time series, statistics, water flow, water runoff.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів наукових досліджень інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



(підпис)

Д.І. Ігонькін

Зміст

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЛЕЮВАННЯ В ПОБУДОВІ РІЧКОВОЇ СИСТЕМИ	8
1.1. Використання комп'ютерного моделювання у вивченні річок малих порядків.....	8
1.2. Формування цифрової моделі рельєфу	11
1.3. Вибір ГІС систем	15
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РІЧКОВОЇ СИСТЕМИ.....	18
2.1. Дослідження порядку річок	18
2.2. Порівняння перших порядків отриманих за допомогою Л діапазону.....	23
2.3. Дослідження басейнів річок Пруту та Сирету 4-го порядку.....	26
2.4. Аналіз площі басейнів	36
2.5. Аналіз щільності	48
ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	64
ДОДАТКИ	66
Додаток 1. Алгоритм Венга та Ліу	66
Додаток 2. Алгоритм побудови річкових порядків.....	71

ВСТУП

Річкові басейнові системи відносяться до складних саморегульованих природних систем. Дослідження порядкової структури річкових систем важливе як у теоретичному, так і у прикладному відношенні. Зокрема це стосується можливостей удосконалення управління басейновими системами, річковими ландшафтами [1]. Існують різні схеми (моделі) надання порядків річкам або їх ділянкам (схеми бонітування). В даній роботі пропонується взяти за основу порядки річок за А. Страллером (Штраллером).

Метою даної роботи буде використання комп'ютерного моделювання для вивчення річок нижчих порядків (до 4-го). Вивчення річок малих порядків є важливою галуззю наукового дослідження в географії, яка вносить вагому інформацію у розуміння природних та антропогенних процесів. Це особливо актуально в контексті сучасних екологічних викликів та необхідності сталого використання природних ресурсів.

Річки малого порядку, часто вважаються за незначні, проте їхнє вивчення принесло численні важливі відкриття та зрозуміння функціонування екосистем. Спостереження за цими водоймами дозволяє науковцям розуміти біорізноманіття, яке вони підтримують. Річки малого порядку є домівками для численних видів рослин і тварин, і вивчення їхніх екосистем розкриває важливі взаємозв'язки у природних процесах.

Гідрологічні аспекти річок малих порядків не можна недооцінювати. Вони можуть визначати водний режим в конкретній місцевості, регулювати гідрологічний цикл та впливати на водні ресурси. Знання про гідрологію цих річок є ключовим для планування стійкого використання водних ресурсів, а також для ефективного управління повеневими ризиками та забезпечення необхідного водопостачання.

Окрім того, річки малих порядків можуть впливати на ландшафтні та геоморфологічні процеси. Вони можуть сприяти формуванню рельєфу, викликати ерозію та седиментацію, що має важливе значення для розвитку територій та ландшафтної динаміки.

Спілкування людей з річками малих порядків також має велике соціокультурне значення. Ці річки можуть служити джерелом питної води, відділенням для рекреації, а також мати значення в культурних аспектах місцевих спільнот. Збереження цих ресурсів стає ключовим завданням для забезпечення екологічної стійкості та збереження національної культурної спадщини.

Узагальнюючи, вивчення річок малих порядків важливе для збереження біорізноманіття, ефективного використання водних ресурсів та розвитку стійких екологічних підходів. Воно не лише розкриває природні процеси, але і служить основою для прийняття інформованих рішень щодо управління природними ресурсами та планування розвитку територій[6].

РОЗДІЛ 1. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ПОБУДОВІ РІЧКОВОЇ СИСТЕМИ

1.1. Використання комп'ютерного моделювання у вивченні річок малих порядків

Існує багато методів вивчення та картографування річок, зокрема і річок перших порядків, для побудови моделі крона-стовбур. Цей процес включає в себе використання різних методів та технологій для створення карт, які відображають географічне розташування, гідрографічну мережу та інші характеристики річкових систем.

Геодезичне картографування включає в себе терестричні вимірювання, що дозволяє здійснити детальний аналіз рельєфу та ландшафту вздовж річок. За допомогою геодезичних інструментів вимірюються висоти, кути та відстані, щоб створити точні топографічні карти регіону.

Космічне знімання, яке включає в себе використання супутникових знімків та літальних дронів, розширює можливості картографування. Супутникові знімки надають обширний обзор річкових систем, тоді як літальні дрони дозволяють отримувати високоякісні знімки території вздовж річок, щоб отримати детальні дані про ландшафт та екосистему.

Гідрографічні карти грають важливу роль у визначенні топографії та гідрології річок. Вони відображають річкові системи, їхні допливи та характеристики водного русла. Крім того, ці карти можуть включати інформацію про водоспади, пороги та перепади висот.

Використання геоінформаційних систем (ГІС) є ключовим етапом у картографуванні річок. ГІС дозволяють обробляти та аналізувати просторові дані, включаючи інформацію про висоти, водний режим та біологічні

характеристики. Це створює можливість взаємодії з географічною інформацією на різних рівнях та враховувати комплексні аспекти річкових систем.

Враховуючи вищесказане, будемо використовувати геоінформаційні системи для отримання даних з різних джерел і побудови моделі річки.

Для того щоб побудувати модель річки необхідно зробити такі кроки:

1. Вибрати джерело даних для моделі місцевості.
2. Вибрати ГІС систему яка буде найкраще підходити під цілі, описані в даній роботі
3. Використати алгоритми, які зможуть точно виконати необхідні розрахунки і створити наочні візуалізації.

В своїй монографії «Пізнання ландшафту: місце і простір» академік М.Д. Гродзинський[10] відмічав що існує якісна зміна в структурі річок між річками 1-3го та 5-го і вище порядків. Його дослідження дають підстави стверджувати, що річкові басейни нижче 3-го та вище 4-го порядків мають якісно відмінні ландшафтні характеристики. Басейни 1-3-го порядку та невеликі басейни 4-го порядку визначаються хоричними особливостями ландшафту, тоді як басейни вище 4-го порядку залежать від тектонічних і макрокліматичних факторів регіонального масштабу. Можна вважати, що басейни 4-го порядку є "вузловими" областями, де зникаються фактори хоричного та регіонального масштабів. Межа між цими масштабними рівнями може мати розмитий характер, ймовірно, проходячи по басейнах 4-го порядку. Важливо враховувати, що цей перехід може бути неоднозначним і розмитим, залежно від конкретних географічних умов.

В даній роботі буде показано перехід від хоричного до регіонального масштабу на прикладі досліджуваних річок. Для цього будуть виміряні такі показники як площа басейну річок в залежності від порядку та густота річкової мережі.

Для того щоб проводити дослідження – необхідно вибрати піддослідну річку. Важливим фактором вибору є те, щоб перші порядки річки були в гірській місцевості з мінімальним впливом людини, оскільки людський вплив може сильно змінити русла річок. Також важливою є можливість в подальшому провести дослідження на місцевості, тому будемо вибирати місцевість в межах західної України.

Враховуючи вище сказане, будемо розглядати річки перших порядків витoku річки Сирет і її приток Бурсуки і Лустун біля с. Долішній Шепіт, Чернівецька область.

1.2. Формування цифрової моделі рельєфу

Під цифровою моделлю рельєфу — як правило розуміють подання рельєфу місцевості у вигляді матриці висот (в англійській літературі - Digital Elevation Model DEM), де кожна точка на матриці матиме узагальнену висоту деякої ділянки рельєфу. Матриця висот може мати регулярні комірки (grid DEM), або не регулярні, побудовані на основі трикутників (TIN DEM). В наш час обидві ці моделі є вільно конвертованими.

В даний час існують такі основні способи отримання цифрової моделі рельєфу:

1. Наземні дослідження
2. Використання наявних картографічних зйомок, карт
3. Стереоскопічні, або радіолокаційні супутникові знімки

Наземні дослідження є найбільш точним методом визначення рельєфу, оскільки немає ніяких обмежень на розширення вимірювань, але з іншого боку це є найдорожчий метод, оскільки, як правило необхідне дороге вартісне обладнання і при цьому неможливо швидко цифрувати великі площі місцевості.

Використання наявних картографічних зйомок. Карт є, по суті, оцифруванням карт і його точність залежить від точності вихідного матеріалу. Як правило цей метод використовують як доповнення до інших типів вимірювання.

Стереоскопічні, або радіолокаційні супутникові знімки дають порівняно невелику точність (до 12м на піксель для TanDEM-X), але зате дають можливість порівняно дешево цифрувати великі площі місцевості.

На даний час існують такі публічно доступні глобальні цифрові моделі місцевості:

1. ALOS World 3D30 – опублікована в 2015 році Японською Аерокосмічною Дослідницькою агенцією і доступна безкоштовно на веб сайті https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm. Модель побудована за допомогою інструменту PRISM[2] який працює на довжині хвилі від 0,52 до 0,77 мікрометрів (фактично видиме світло)
2. SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 30m – опублікована 2014 році, включає дані отримані за допомогою NASA SIR (Spaceborne Imaging Radar) який працює на довжинах хвиль 6 та 3 см. Також дані були покращені за допомогою ASTER GDEM2 та USGS GMTED2010. Модель також можна безкоштовно отримати на вебсайті <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSRTM.082015.432>
[6.1](#)
3. ASTER GDEM3 модель з роздільною здатністю 30м на піксель опублікована в 2019р. Базується на інструменті ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) який має можливість працювати в діапазоні від видимого світла до інфрачервоного світла (0,520-11,650 нанометрів). Дані також можна вільно скачати з сайту NASA[4]
4. TanDEM-X модель з роздільною здатністю від 12 до 90 м створена Європейською Космічною Агенцією використовуючи інструмент SAR (Synthetic-aperture radar) з довжиною хвилі 3 см. Дані з роздільною здатністю 90м можна вільно завантажити з <https://download.geoservice.dlr.de/TDM90/> Для 12м та 30м необхідна

реєстрація з обґрунтуванням необхідності отримання даних для академічних досліджень[7] <https://tandemx-science.dlr.de/>

Особливістю всіх наведених моделей є те, що вони використовують X-діапазон довжин хвиль для отримання високого розширення даних, при цьому такі хвилі, як і видиме світло, будуть відбиватися від рослинності, тому отримані дані будуть включати висоту дерев. Для того щоб отримувати дані без висоти дерев – необхідно використовувати дані в L-діапазоні, які матимуть розширення до 50м на піксель.

На разі є доступні дані отримані з інструменту PALSAR. PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) є важливим інструментом дистанційного зондування, здатним працювати в L-діапазоні частот. Цей діапазон, який охоплює приблизно від 1 до 2 гігагерц, надає PALSAR унікальні можливості для збору даних про рельєф землі через рослинність.

Однією з ключових особливостей PALSAR є його здатність проникати через рослинні покриви та інші поверхневі перешкоди, що робить його ідеальним інструментом для вивчення територій з великою щільністю рослинності або лісостепу. Такий аспект функціональності PALSAR відкриває нові перспективи для дослідження природних екосистем та розуміння їх структури та еволюції.

Місія ALOS (Advanced Land Observing Satellite) є однією з визначних місій, де використовувався PALSAR. Запущений японською космічною агенцією JAXA, ALOS мав на меті збільшення наших знань про земну поверхню та динаміку змін, які відбуваються на ній з часом.

На разі доступні дані з інструменту PALSAR не зведені в глобальну модель (на відміну від прикладів вище). Наявні дані можна завантажити <https://search.asf.alaska.edu/#/> . В майбутньому плануються запуски супутників для отримання глобальної мапи висот в L діапазоні, зокрема запланований запуск NASA NISAR ([https://en.wikipedia.org/wiki/NISAR_\(satellite\)](https://en.wikipedia.org/wiki/NISAR_(satellite)))

1.3. Вибір ГІС систем

Геоінформаційна система (ГІС) - сучасна комп'ютерна технологія, що дозволяє поєднати модельне зображення території (електронне відображення карт, схем, космо-, аерозображень земної поверхні) з інформацією табличного типу (різноманітні статистичні дані, списки, економічні показники тощо). Також, під геоінформаційною системою розуміють систему управління просторовими даними та асоційованими з ними атрибутами. Конкретніше, це комп'ютерна система, що забезпечує можливість використання, збереження, редагування, аналізу та відображення географічних даних.

На даний момент існують багато ГІС, кожна з яких була побудована для досягнення якоїсь специфічної мети. Перш ніж перейти до вибору системи необхідно визначитись з вимогами до неї:

1. Система повинна бути до ступною без необхідності доступу в мережу інтернет. Хоча на даному етапі розвитку людства доступ в мережу інтернет перестав бути проблемою, але все таки можливість роботи без підключення до мережі надає ряд переваг, таких як:
 - a. можливість використання певної версії продукту, що дає можливість отримувати такі самі результати, як описано в роботі
 - b. можливість контролювати дані, використанні в дослідженнях – оскільки робота ведеться без підключення до мережі, то немає ризику викрадення даних досліджень третіми особами.
 - c. Швидша обробка даних. На сучасному комп'ютері швидкість локальної ГІС системи буде краща ніж такої ж системи, яка працює на віддалених комп'ютерах.

2. Система повинна бути безкоштовною для академічних цілей. Це необхідно для того щоб будь який охочий мав змогу скористатися результатами роботи
3. Система повинна мати модуль для роботи з річками, оскільки мета роботи є визначення перших порядків річок
4. Система повинна мати можливість підключати мережеві карти такі як OSM та Google Maps. Це необхідно для наочного орієнтування по досліджуванні ділянці.
5. Можливість написання програм по обробці/аналізу даних, що знаходяться в ГІС. Якщо якогось інструменту не існує в системі – можливість написання цього інструменту значно розширює можливості ГІС.

На підставі даних з (<https://gisgeography.com/best-gis-software/>) будемо розглядати такі ГІС системи:

1. ArcGIS Pro – сучасна система від Esri єдиною проблемою якої є її ціна
2. QGIS3 – геоінформаційна система з відкритим кодом, яка має величезну підтримку спільноти, тому має всі необхідні інструменти. Єдиним її недоліком є відсутність передових інтеграцій.
3. Hexagon Geomedia – потужна система від Hexagon, яка в зв'язці з їхнім інструментом ERDAS Imagine дозволяє обробляти дані з радарів в їхньому нативному форматі. Недоліками є ціна системи та неможливість працювати з форматами інших ГІС.
4. MapInfo Professional – ГІС система від Precisely, яка має більшість необхідних інструментів. Недоліками, як і в випадку з Geomedia є висока ціна, та проблеми з використанням форматів сторонніх ГІС.

	ArcGIS Pro	QGIS3	Hexagon Geomedia	MapInfo Professional
Відсутність необхідності доступу в інтернет	+	+	+	+
Безкоштовна для академічних цілей	-	+	-	-
Модуль для роботи з річками	+	+	+-	+-
Підключення мережевих карт	+	+	+	+
Можливість писати свої алгоритми	+	+	-+	

Hexadon Geomedia та MapInfo Professional є системами більш орієнтованими на комерційне використання для інженерних проектів ніж для академічних досліджень, тому вони не містять модулів які дозволяють визначати басейни річок та їхні порядки.

ArcGIS Pro є безумовно найкращим рішенням на сьогоднішній час, але її вартість є стримуючим фактором для України на сьогоднішній час.

Враховуючи вище наведене - будемо використовувати Qgis версії 3.28. Оскільки ця система є безкоштовною, з відкритим вихідним кодом і широко застосовується в академічній спільноті.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ РІЧКОВОЇ СИСТЕМИ

2.1. Дослідження порядку річок

Для початку почнемо з даних отриманих від ALOS World 3D30. Зайдемо на їх сайт і скачаємо мапу висот, для отримання витоків річки Серет потрібно два файли висот, а саме: ALPSMLC30_N047E025_DSM.tif та ALPSMLC30_N048E025_DSM.tif

Відкриємо Qgis і поставимо “QuickMapServices” плагін, для цього відкриємо Plugins-> Manage and install plugins і в пошуку введемо назву плагіна і натиснемо Install. Цей плагін дозволить нам добавляти онлайн карти місцевості в Qgis проект.

Тепер створимо нову директорію в файловій системі для проекту геоінформаційної системи. Після того добавимо туди отримані файли висот.

Створимо новий проект вибравши Project – New і збережемо його в директорію створену раніше. Добавимо відкриту карту Open Street Map до проекту вибравши її в меню Web-QuickMapServices-OSM-OSM standard. Також добавимо вибрані файли висот знайшовши їх в перегляді файлів з лівого боку. Отримаємо наступне зображення:

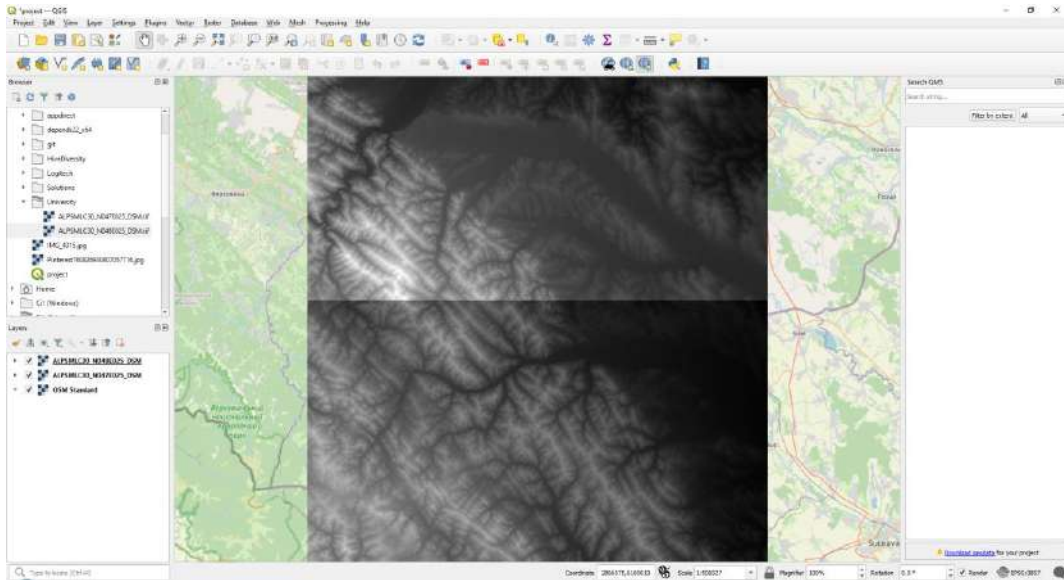


Рисунок 1 Знімки висот з супутника

Як бачимо, сильно помітна межа між двома регіонами, щоб її позбутися створимо усереднене зображення для цього скористаємося функцією Merge (зливання), яку можемо знайти в меню Raster – Miscellaneous. Далі необхідно вибрати два добавленні рівні та вибрати результуючий файл. Обов’язково необхідно вибрати тип даних який для цієї мапи буде int16.

Тепер необхідно перетворити нашу мапу висот з географічної системи координат в проектовану систему координат скориставшись меню Raster-Projection-Warp. В меню треба буде вибрати рівень злитий на попередньому кроці, Target CRS вибрати систему координат, яка стоїть по замовчуванню для проекту, та створити результуючий файл. Обов’язково необхідно вибрати метод комбінування (Resampling method to use) як Середній (Average), оскільки вибирання методу по замовчуванню призведе до артефактів в мапі висот які не дадуть рівномірного стоку. Отримаємо наступне зображення:

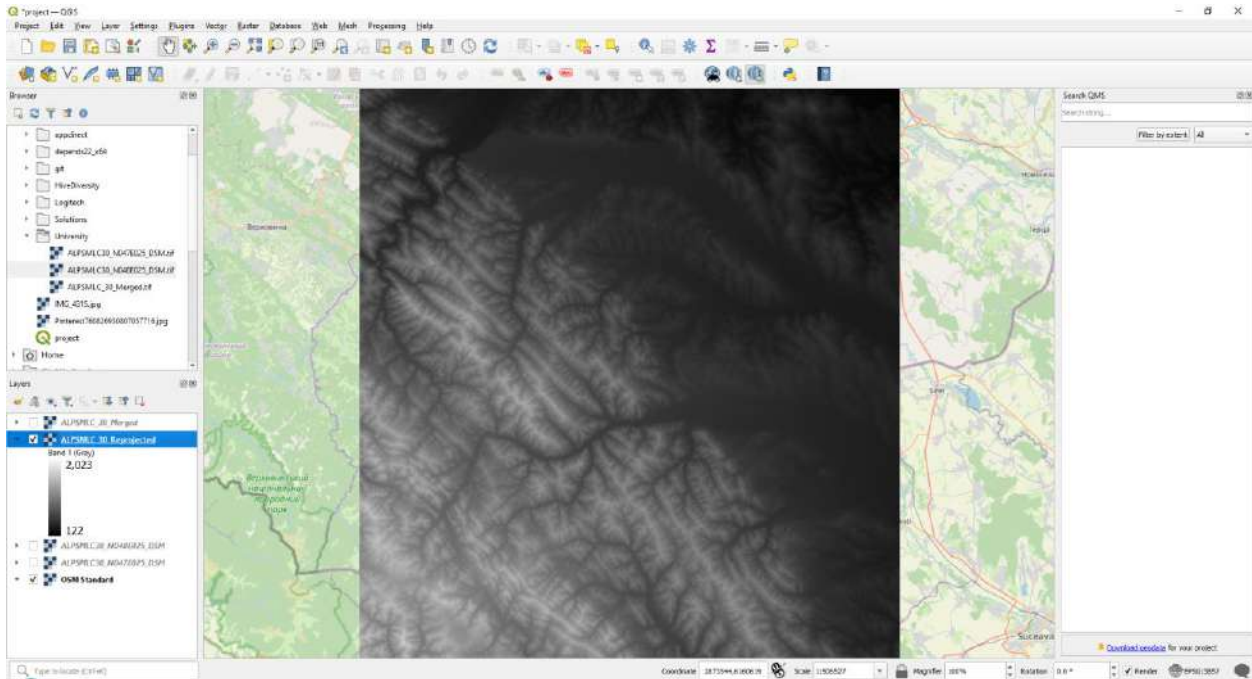


Рисунок 2 Знімки висот після злиття

Тепер маючи мапу висот, яка прив'язана до місцевості, можемо скористатися алгоритмом Венга та Ліу (Lei Wang & Holiday Liu) (9) Цей алгоритм надає можливості ефективно будувати мережу потоків за мапою висот для цього зробимо наступні кроки:

1. Додаємо панель процесінгу виконавши Processing-Toolbox
2. В панелі процесінгу за допомогою пошуку знайдемо Fill Sinks (Wang&Liu), і натиснемо на нього.
3. У вікні, що відкриється, виберемо фінальну мапу висот, мінімальний нахил виставимо в 0,01 градус, вибираємо результуючий файл і запускаємо процес

Маючи мережу потоків ми можемо побудувати річкові порядки за допомогою Strahler order в панелі процесінгу. Там необхідно вибрати модель висот створену на попередньому кроці та результуючий файл. Отримаємо наступне зображення:

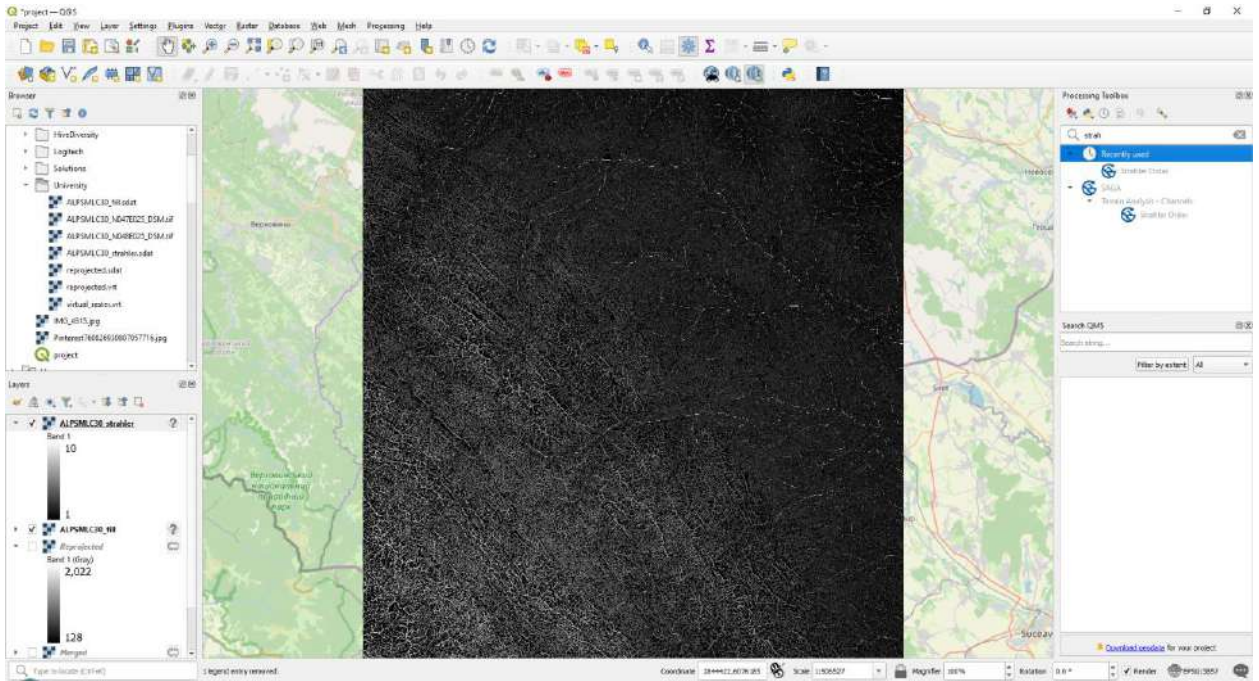


Рисунок 3 Отримана річкова мережа

Тепер у властивостях цього рівня виставимо “Singleband pseudocolor” та сховаємо річки першого порядку, як показано на малюнку:

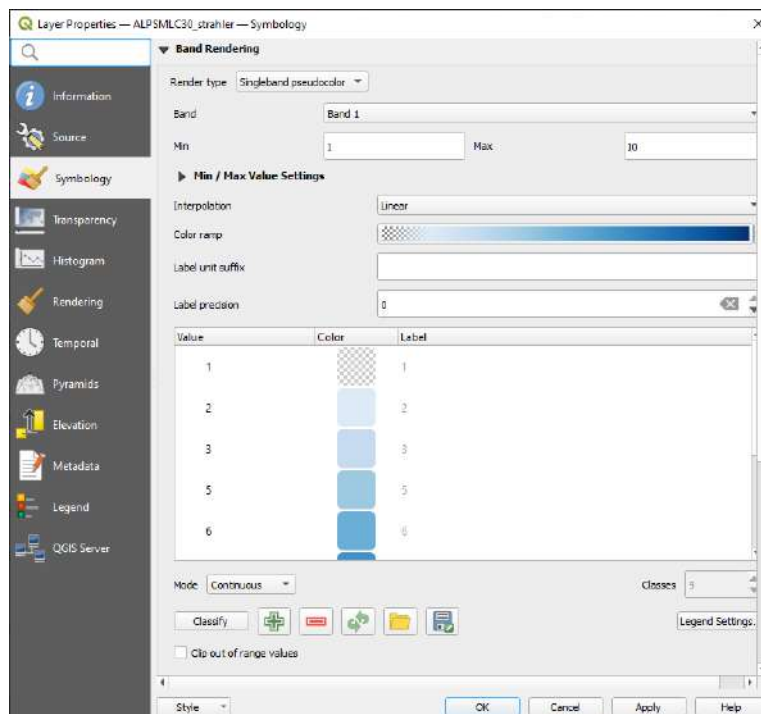


Рисунок 4 Налаштування вигляду річкової мережі

Тепер наближуючись на мапі до приток Бурсуки і Лустун отримаємо наступні зображення

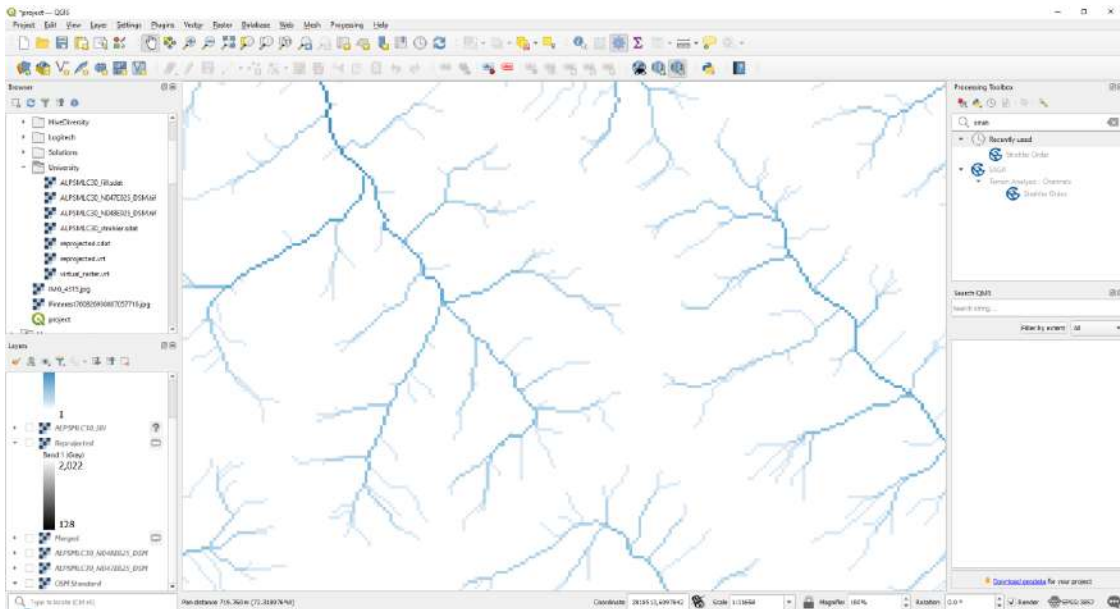


Рисунок 5 Початок річки Бурсуки

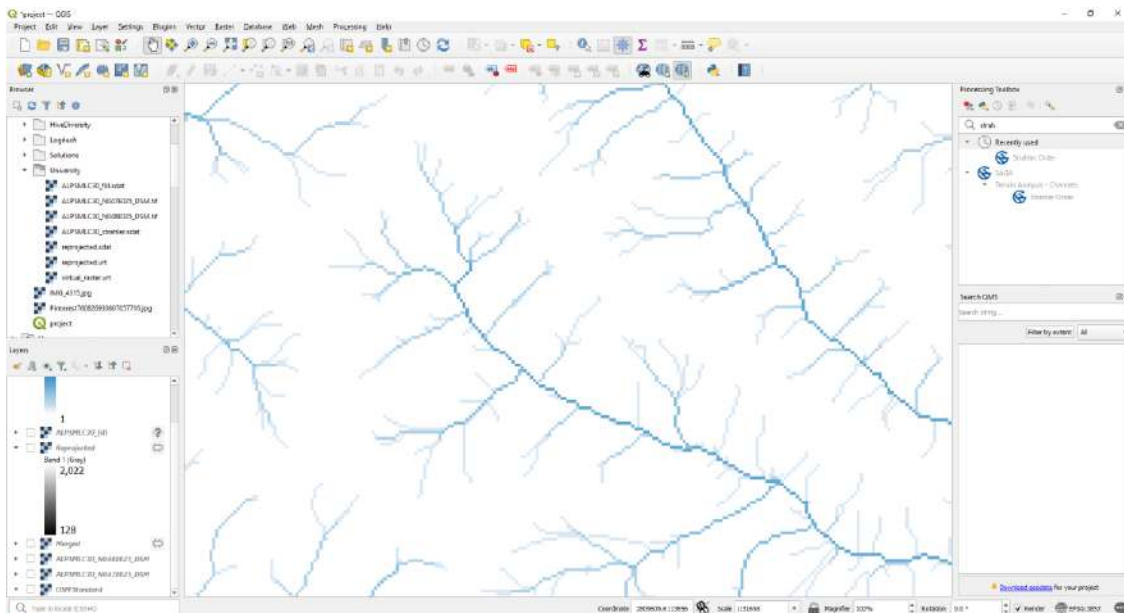


Рисунок 6 Початок річки Лустун

2.2. Порівняння перших порядків отриманих за допомогою L діапазону

Річкова система побудована в попередньому розділі побудована на основі мапи висот, яка створена за допомогою хвиль видимого світла, тому ця висота буде включати розмір рослинності.

Якщо ми накладемо отриману річкову систему на зображення з супутнику ми отримаємо, що перші порядки річок якраз і розташовані в лісисті місцевості:

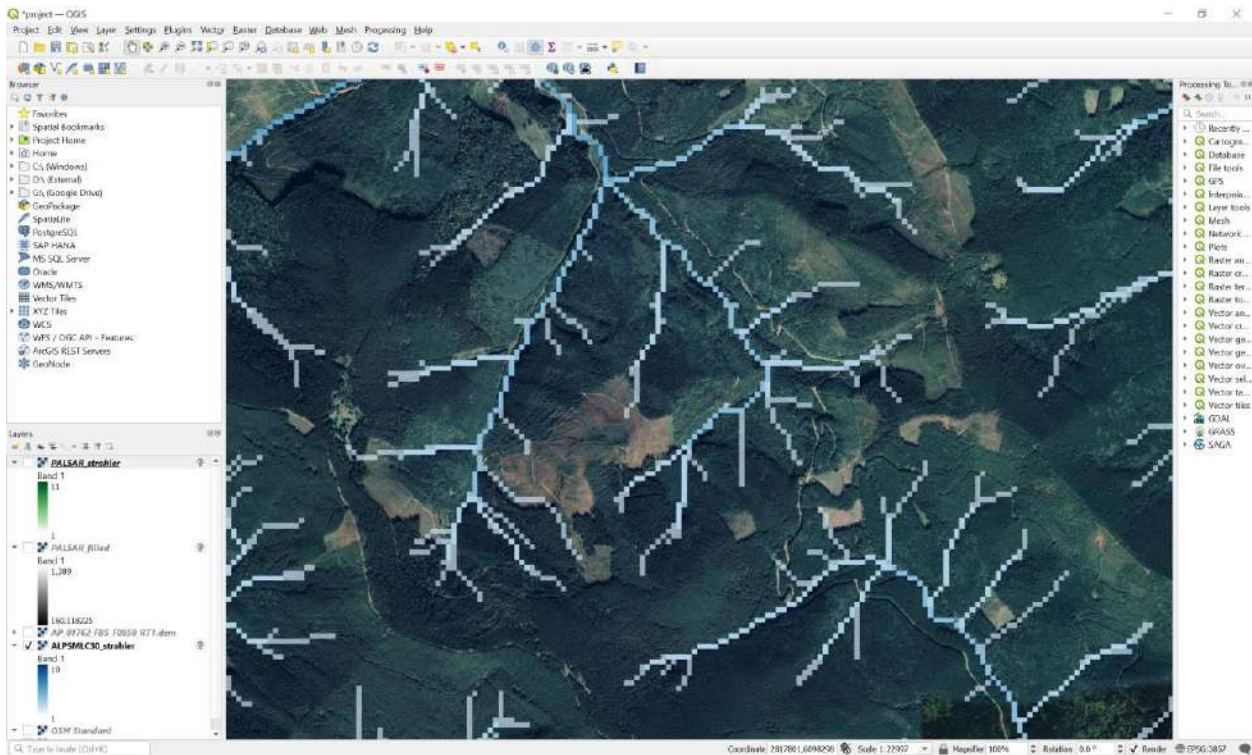


Рисунок 7 Річкова мережа накладена на супутниковий знімок

Щоб нівелювати цю проблему ми можемо отримати дані з L діапазону хвиль, які, теоретично, не мають відбиватися від рослинності і тому отримана висота буде висотою саме місцевості, а не рослинності, яка на ній росте. Проблемою цього підходу, є те, що загальних мап земної поверхні отриманих за допомогою L діапазону немає, а є тільки окремі супутникові знімки.

За допомогою сайту <https://search.asf.alaska.edu> ми можемо вибрати область, яка нас цікавить і вибрати PALSAR як джерело ([https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=8.742¢er=24.241,47.253&polygon=POLYGON\(\(25.1984%2047.9245,25.4066%2047.9245,25.4066%2048.0377,25.1984%2048.0377,25.1984%2047.9245\)\)&dataset=ALOS&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP017620950-KMZ](https://search.asf.alaska.edu/#/?zoom=8.742¢er=24.241,47.253&polygon=POLYGON((25.1984%2047.9245,25.4066%2047.9245,25.4066%2048.0377,25.1984%2048.0377,25.1984%2047.9245))&dataset=ALOS&resultsLoaded=true&granule=ALPSRP017620950-KMZ)). Це дасть нам вибірку знімків, які приблизно покривають задану територію. На жаль, не має можливості вибрати знімок який точно буде найкраще репрезентувати вибрану місцевість, але вибравши декілька з них можемо бачити, що ALPSRP017620950-RTC_HI_RES має необхідну мапу висот.

Завантаживши обраний файл і повторивши процес описаний в попередньому розділі – ми отримаємо річкову систему побудовану на новій мапі висот. Для зручності представлення виберемо червоний градієнт замість синього.

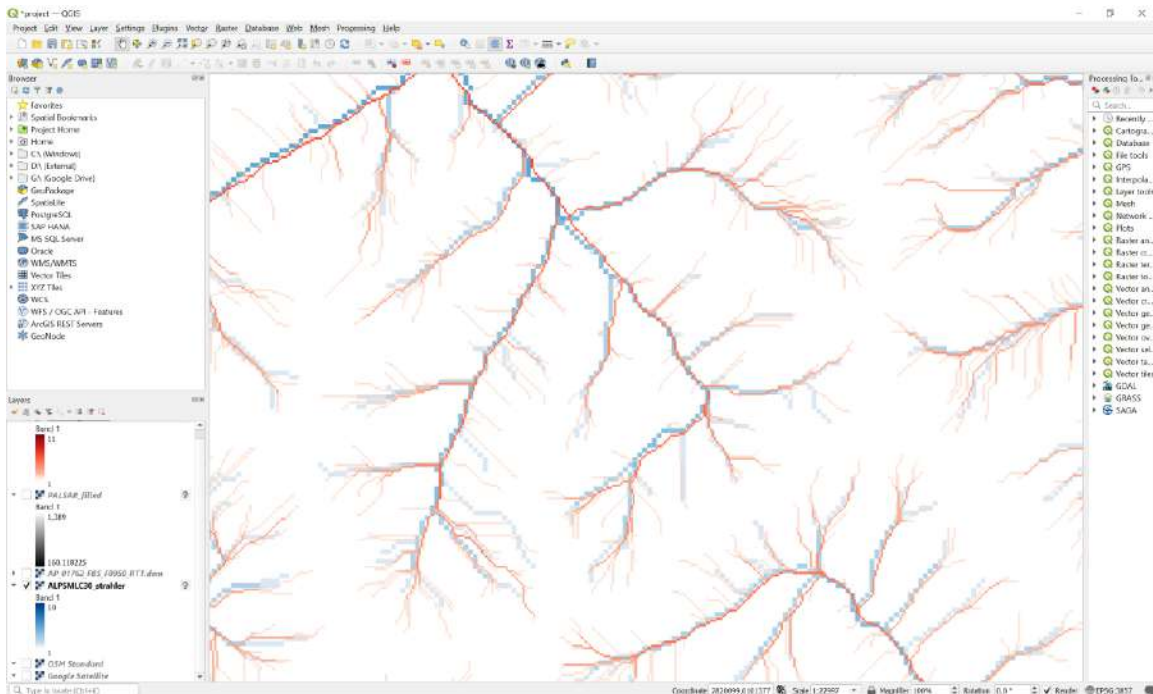


Рисунок 8 Початок річки Бурсуки

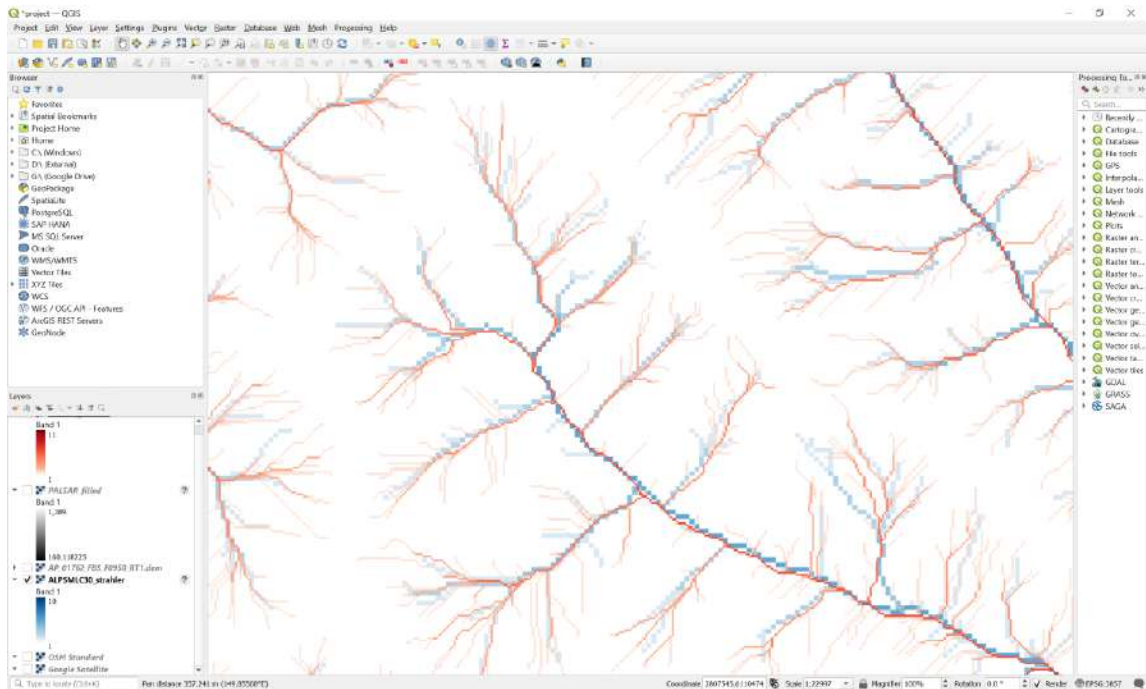


Рисунок 9 Початок річки Лустун

Як бачимо, мережі річок отриманих на двох різних вибірках даних практично співпадають, хоча і дані отримані за допомогою інструменту PALSAR мають більшу точність, оскільки розмір пікселя є більш ніж в два рази менший (отриманий файл має розширення 12.5 м на піксель).

2.3. Дослідження басейнів річок Пруту та Сирету 4-го порядку.

Будемо використовувати пакет Qgis для побудови моделі басейнової системи річок Прут і Сирет 4-го порядку. Для цього використаємо карту висот від ALOS World 3D30 західного регіону України від 47 до 50 градуса північної широти та від 22 до 26 градуса східної довготи : N047E022-N049E025. Важливо отримати прямокутний шматок поверхні, оскільки подальші алгоритми некоректно працюють з поверхнями неправильної форми.

Відкриємо Qgis і поставимо “QuickMapServices” плагін, для цього відкриємо Plugins-> Manage and install plugins і в пошуку введемо назву плагіна і натиснемо Install. Цей плагін дозволить нам добавляти онлайн карти місцевості в Qgis проект.

Добавимо до проекту скачані напередодні висоти, отримаємо:

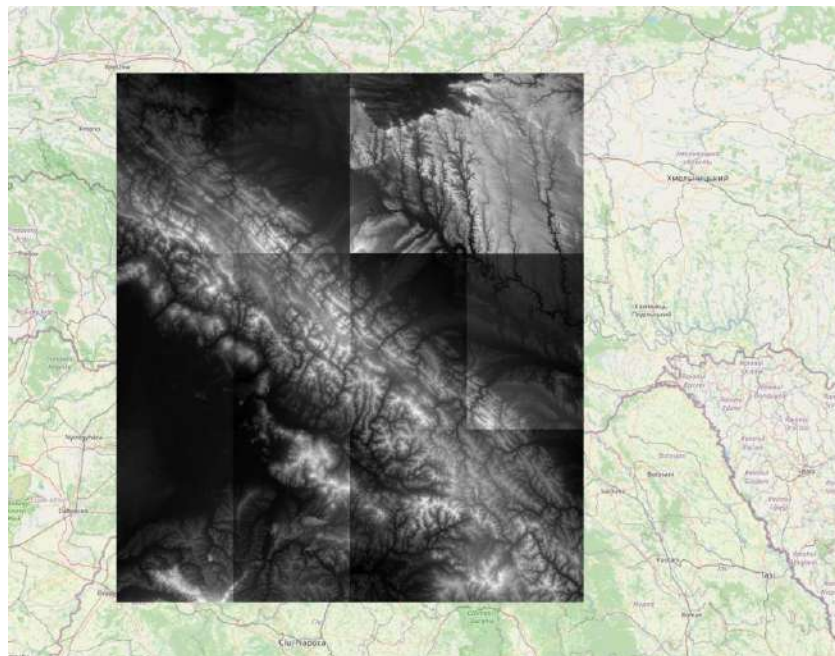


Рисунок 10. Мапа поверхні з супутниковими знімками

Тепер за допомогою функції Merge (зливання), яку можемо знайти в меню Raster – Miscellaneous з'єднаймо отримані висоти в один рівень. Після цього перенесемо отриману мапу висот в проєктовану систему координат скориставшись Raster-Projection-Warp. Обов'язково виберемо метод комбінування (Resampling method to use) як Середній (Average). Отримаємо наступний результат:

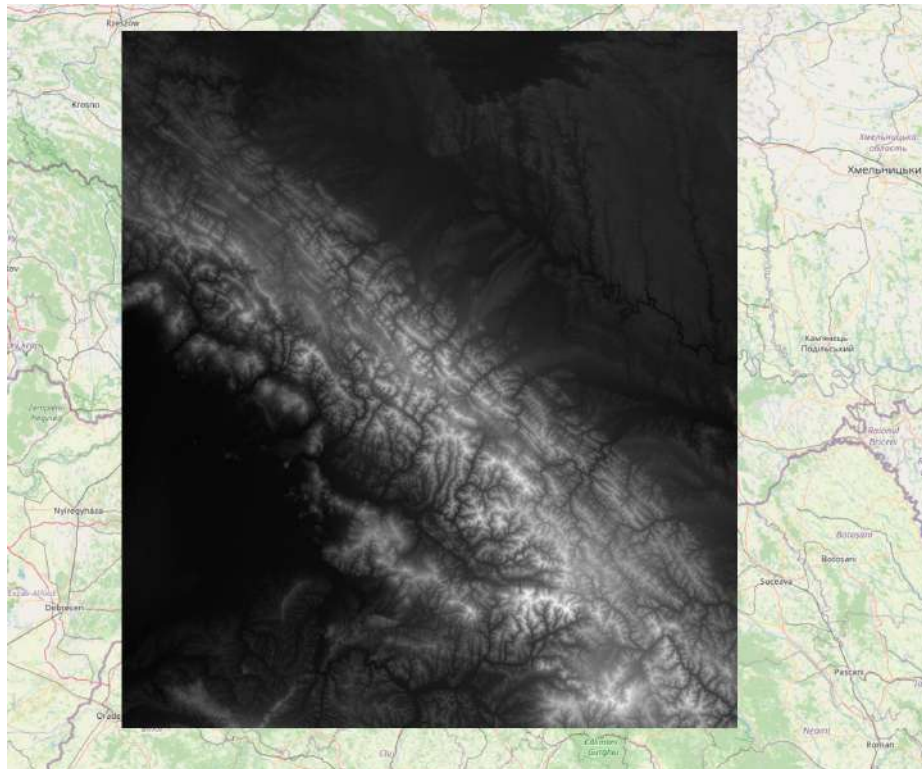


Рисунок 11. Злиті та перенесені знімки

Тепер маючи мапу висот, яка прив'язана до місцевості, можемо скористатися алгоритмом Венга та Ліу (Lei Wang & Holiday Liu) (9) Цей алгоритм надає можливості ефективно будувати мережу потоків за мапою висот для цього зробимо наступні кроки:

4. Додавимо панель процесінгу виконавши Processing-Toolbox

5. В панелі процесінгу за допомогою пошуку знайдемо Fill Sinks (Wang&Liu), і натиснемо на нього.
6. У вікні, що відкриється, виберемо фінальну мапу висот, мінімальний наклон виставимо в 0,01 градус, вибираємо результуючий файл і запускаємо процес

Маючи мережу потоків ми можемо побудувати річкові порядки за допомогою Strahler order в панелі процесінгу. Там необхідно вибрати модель висот створену на попередньому кроці та результуючий файл. Після того у властивостях цього рівня виставимо “Singleband pseudocolor” та покажемо тільки річки 4-го порядку. Наклавши отримані дані на мапу отримаємо 4-ті порядки річок Прут і Сірет.

Річка Прут 4-го порядку знаходиться неподалік від Говерлянського (Прутського) водоспаду (Розташований на півдні Надвірнянського району Івано-Франківської області, на схід від вершини Говерли). Зеленим кольором на малюнку позначено 4-й порядок:

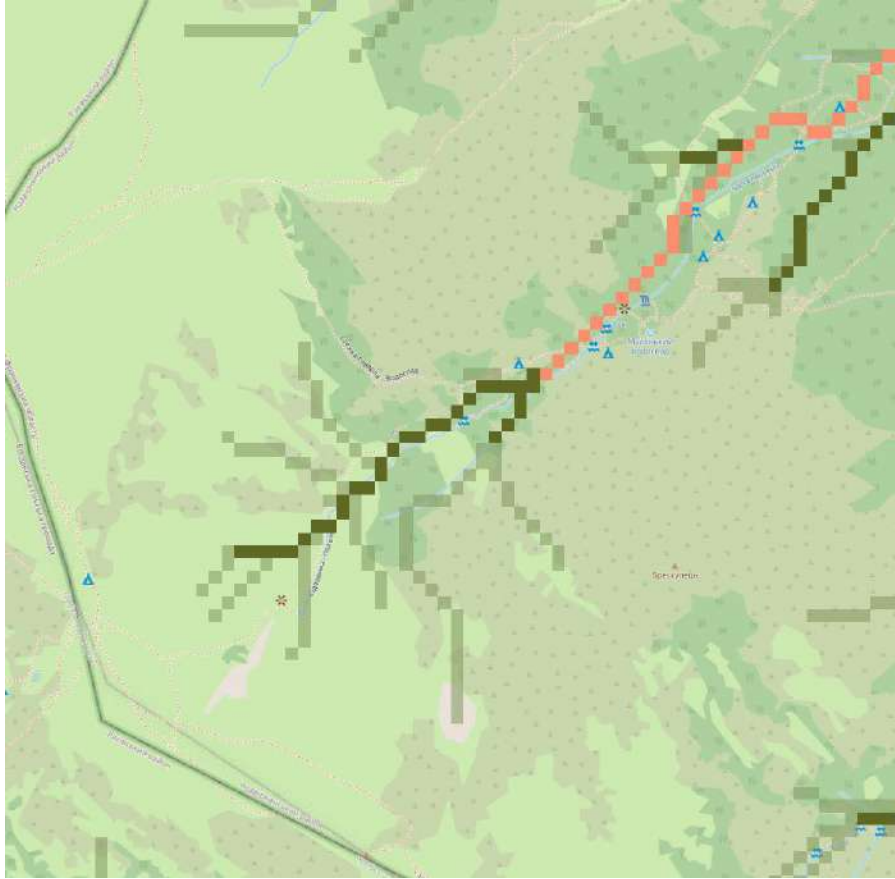


Рисунок 12. Річка Прут 4-го порядку

Стосовно річки Сірет ситуація є трохи складніше, оскільки річка Сірет визначається як річка, яка утворюється від злиття потоків Бурсуки й Лустун біля села Долішній Шепіт, але при цьому зливаючись ці річки створюють потік 9-го порядку.

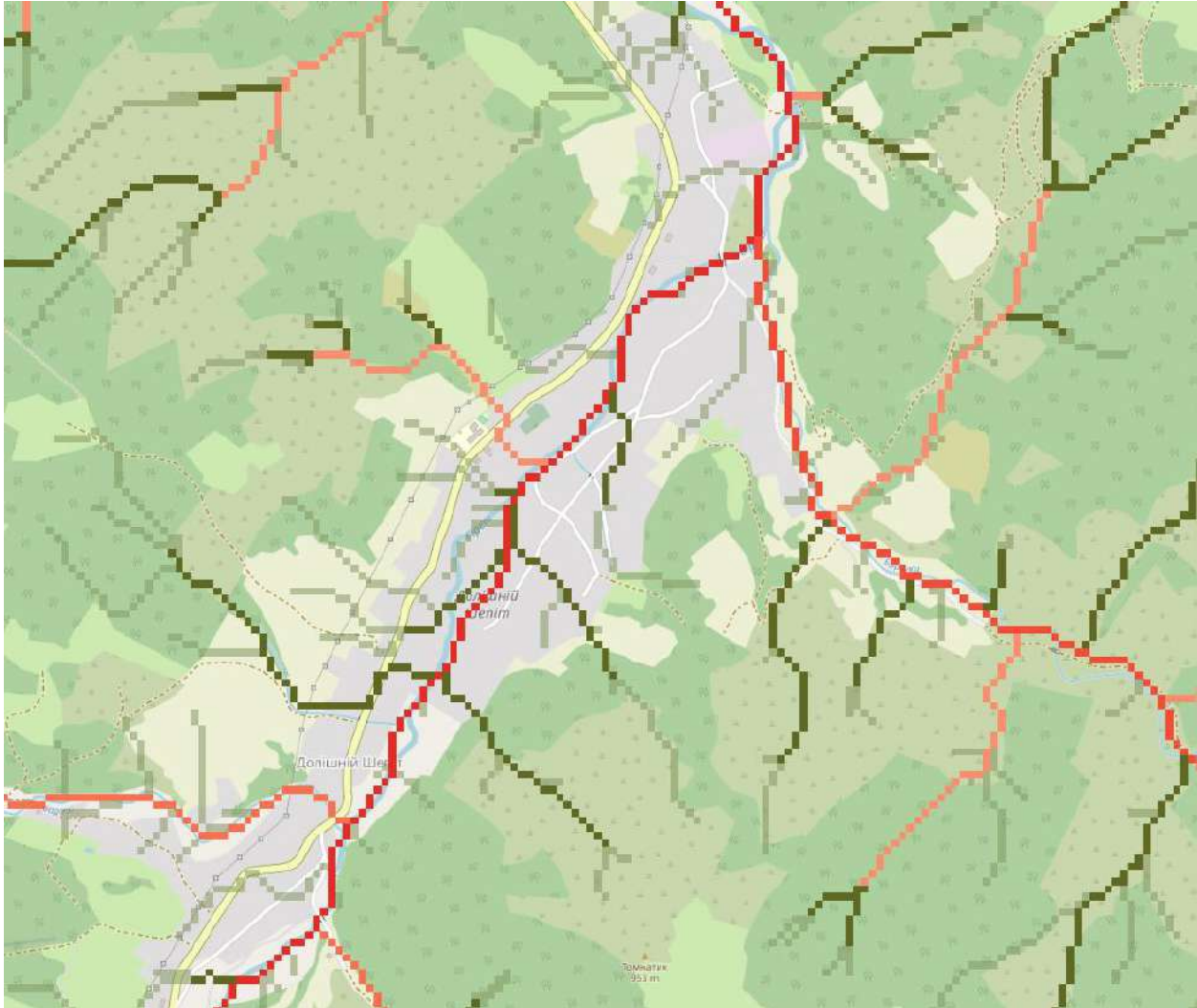


Рисунок 13. Утворення річки Сірет

Тому, в подальшому будемо рахувати точкою стоку для побудови басейну район Прутського водоспаду та злиття витоки річки Лустун.

Для побудови басейну спочатку потрібно визначити координати точки в якій ми будемо рахувати потік. Точка має бути в координатах проекту. Для того щоб обчислити точку в координатах проекту цього створимо новий рівень (Layer-New Shapefile Layer), вкажемо ім'я prut_outlet і тип point. Після цього необхідно переключити рівень в режим редагування (правий клік та Toggle Editing в меню). Потім натискаємо на “Add point feature” в меню зверху та натискаємо місце на мапі та вказуємо 1 в меню яке покажеться.

Після цього знову потрібно натиснути Toggle Editing для того щоб вийти з режиму редагування. Після цього відкриваємо “Open Attribute Table” з контекстного меню для prut_outlet. В вікні що відкриється вибираємо “Field Calculator”

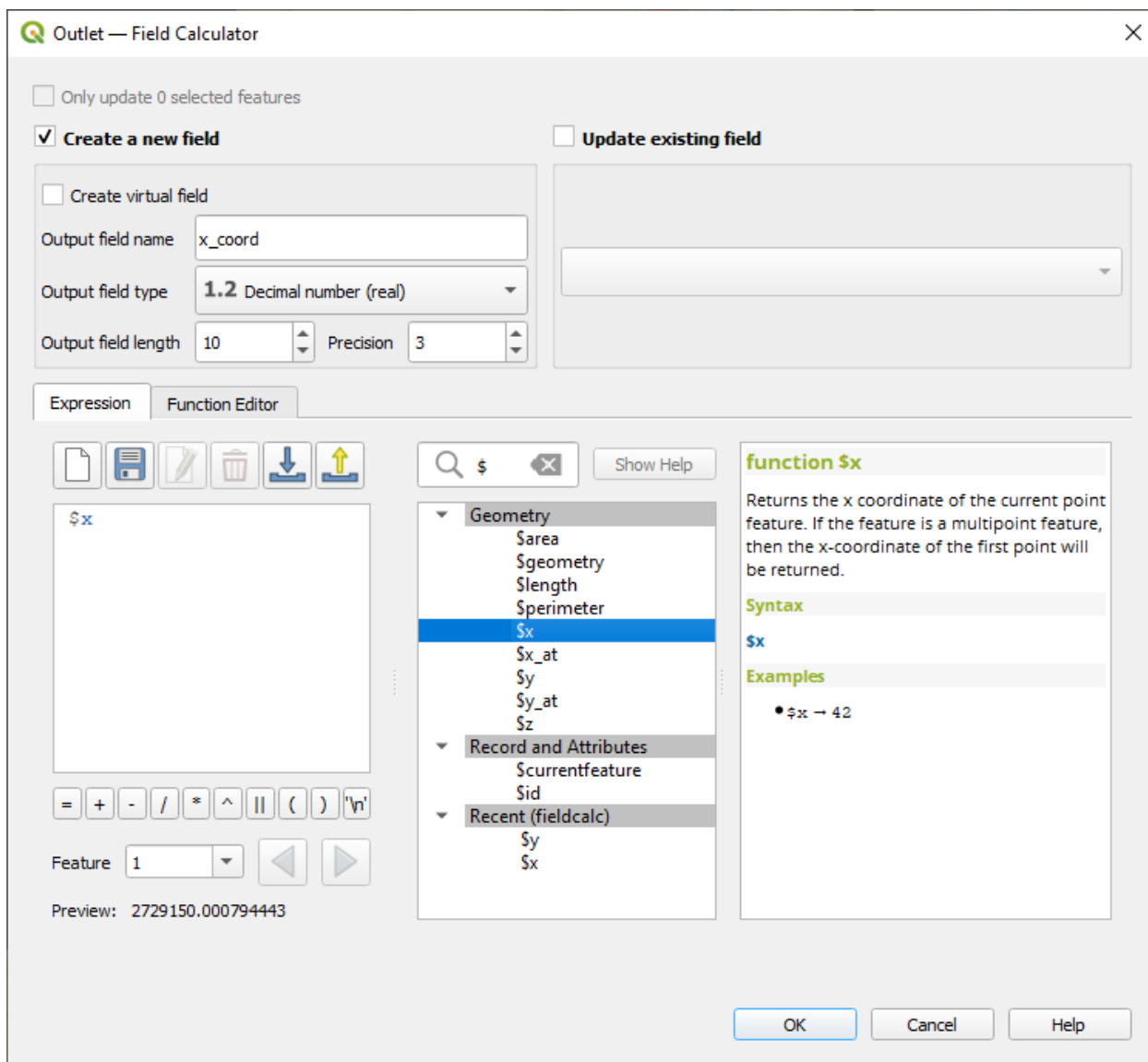


Рисунок 14. Калькулятор полів

У вікні калькулятора вибираємо “Create virtual field”, вибираємо тип як “Decimal number”, та вибираємо \$x у вікні пошуку. Таким чином ми

отримаємо координату по вісі абсцис. Повторюємо процес зі змінною y та отримуємо значення по осі ординат.

Маючи координати витoku застосуємо інструмент “Upslope Area”, який рахує площу стоку для заданої точки. Для цього відкриваємо “Processing Tools->SAGA-> Terrain Analysis – Hydrology -> Upslope Area”

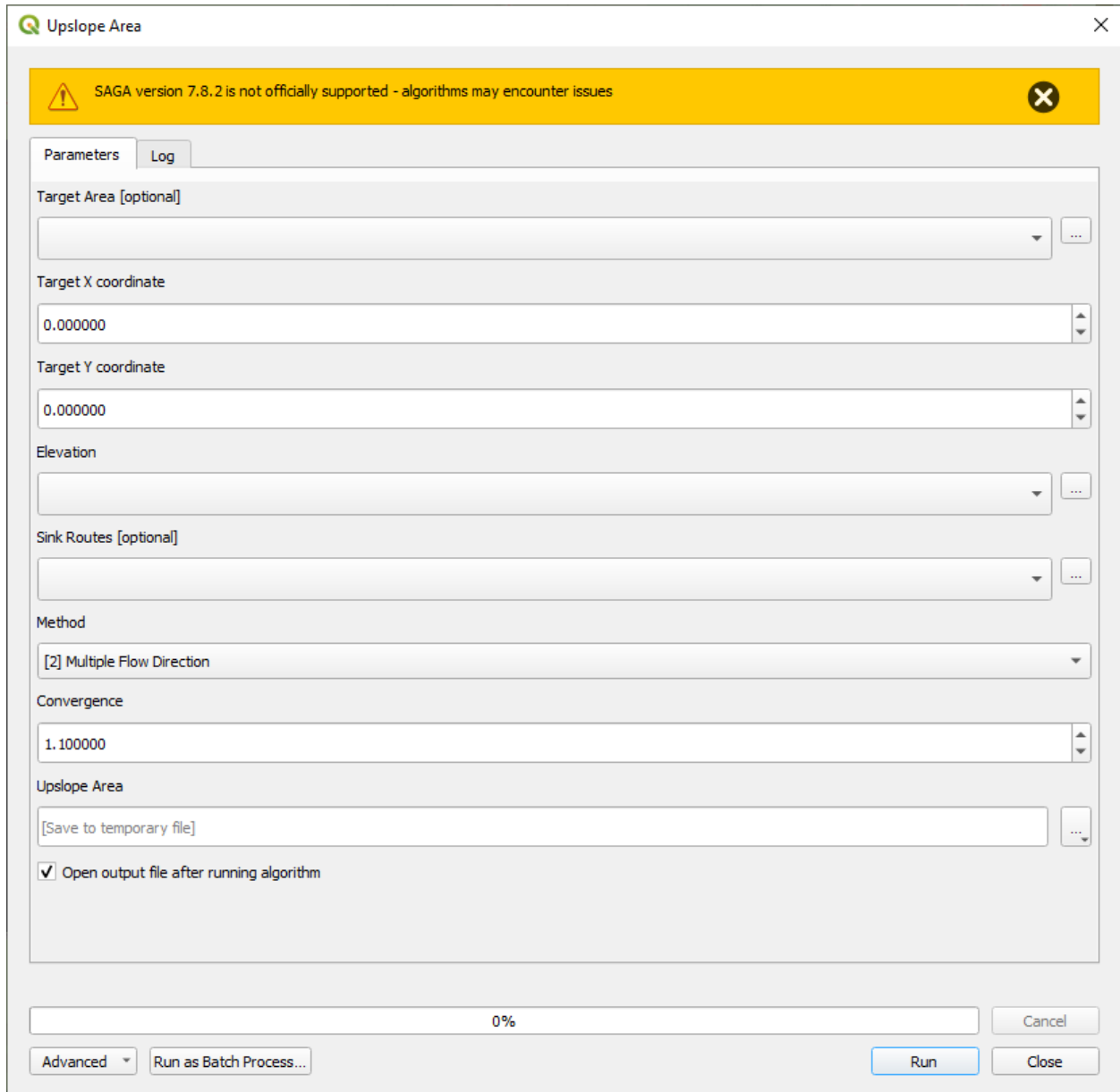


Рисунок 15. Розрахунок стоку

В Target X coordinate вводимо отриману x координату, в target y coordinate – отриману y координату. В Elevation – результуючу матрицю від алгоритму Венга та Ліу та Deterministic 8 як алгоритм пошуку.

Як результат ми отримуємо новий рівень. В цьому рівні виставимо колір та прозорість як показано на малюнку:

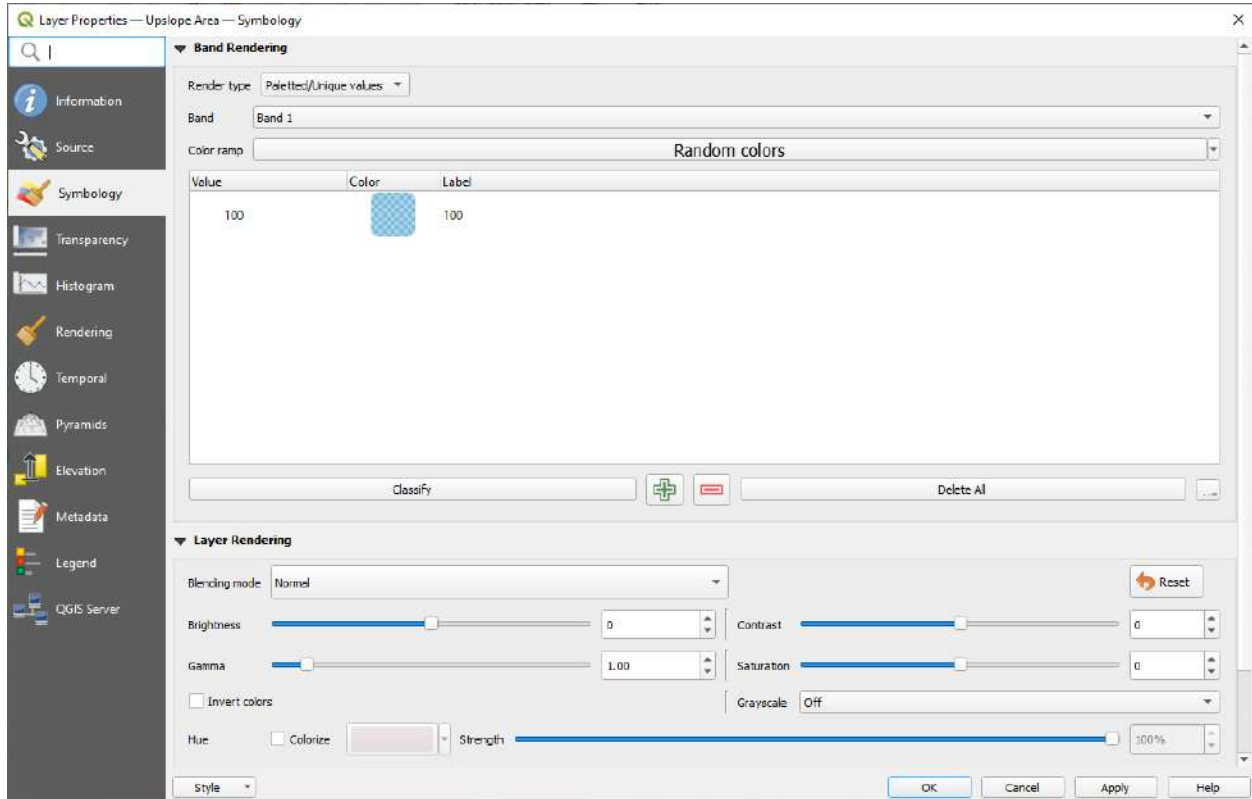


Рисунок 16. Колір та прозорість

Отримаємо наступний вигляд басейну 4-го порядку для річки Прут:

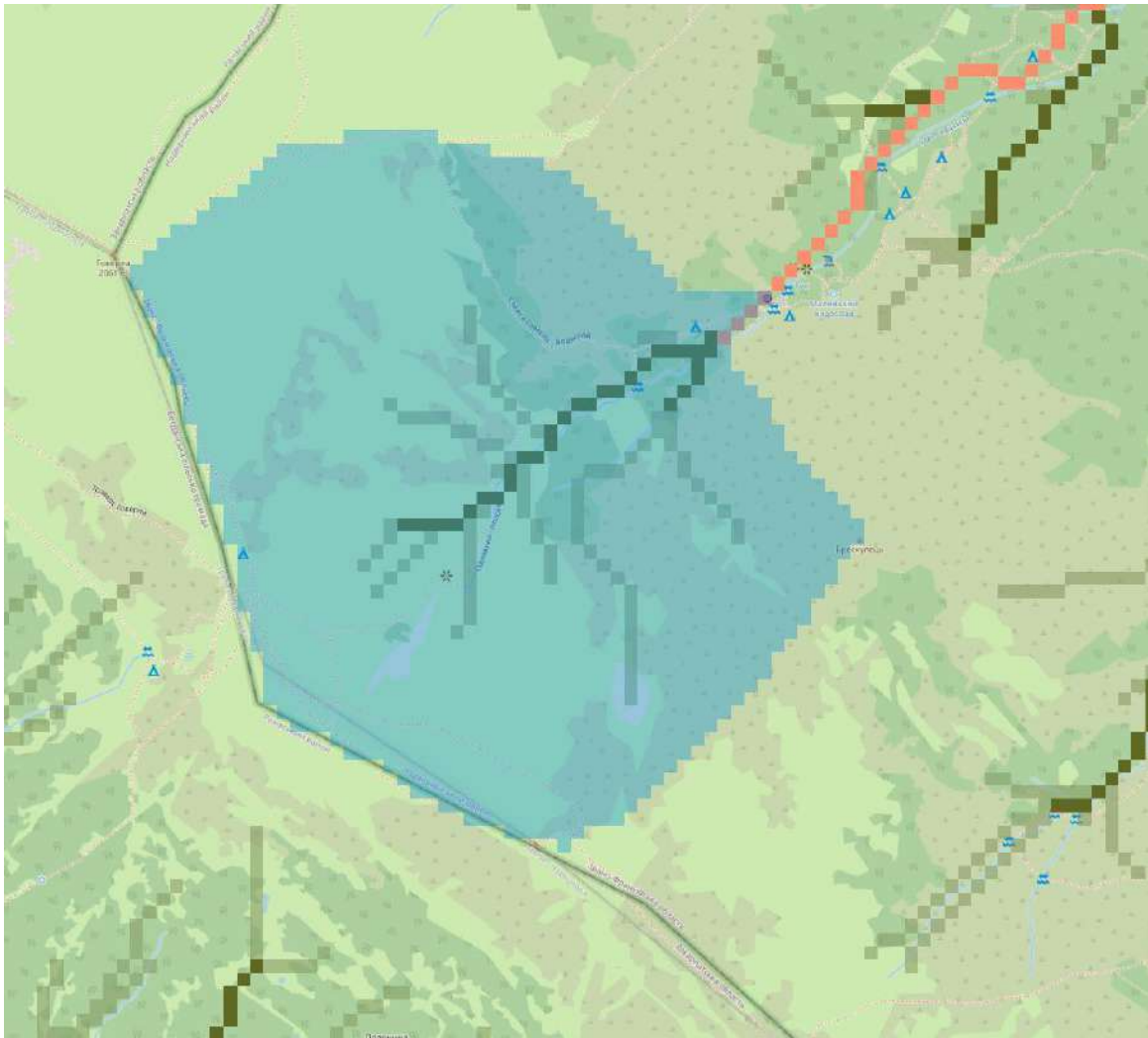


Рисунок 17. Басейн р. Прут

Повторюючи аналогічні дії для річки Сірет (на справді однієї з приток р. Сірет) отримаємо наступну мапу:

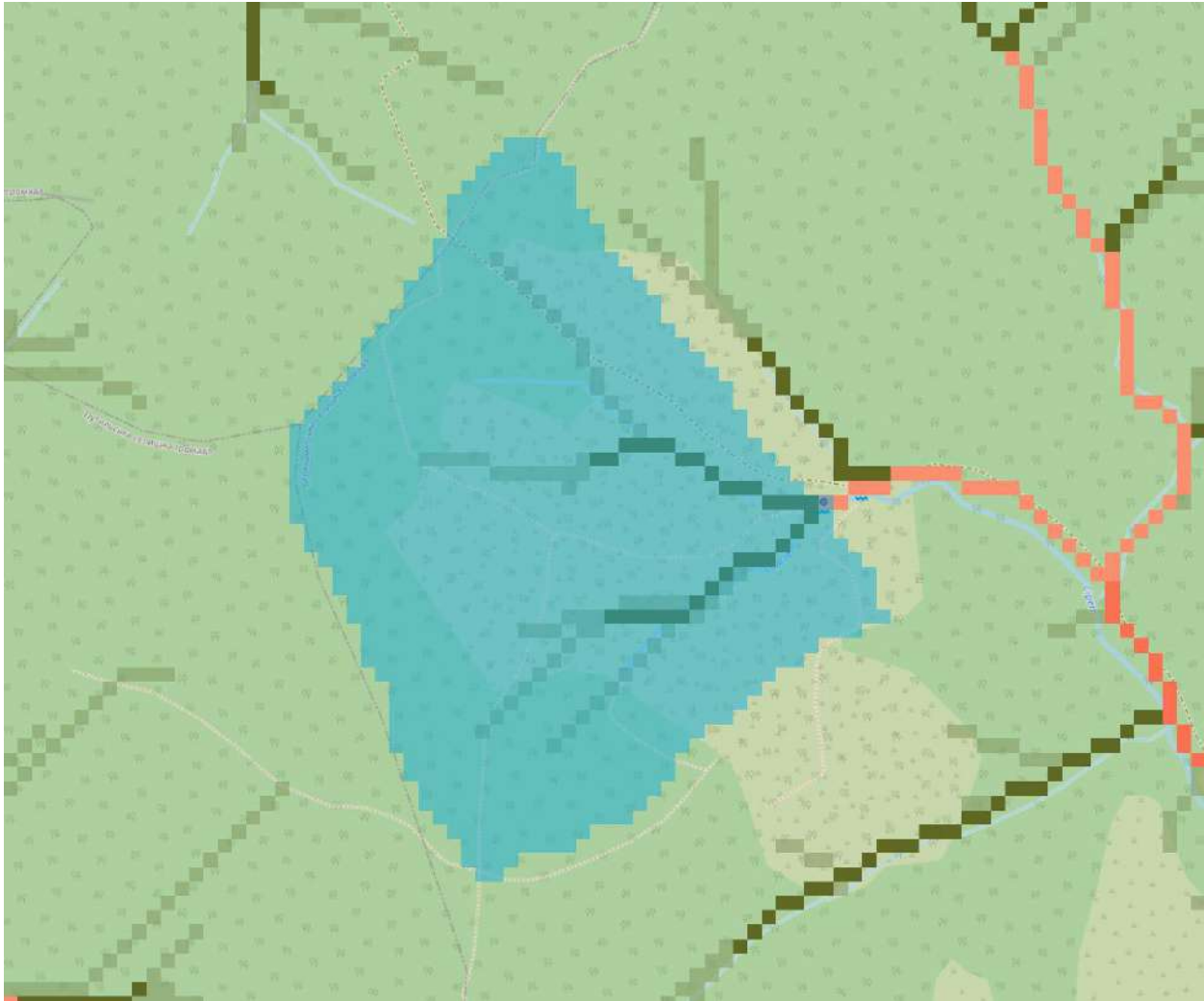


Рисунок 18. Басен р. Сірет

Upslope Area використовує

Deterministic 8

- O'Callaghan, J.F. / Mark, D.M. (1984):

'The extraction of drainage networks from digital elevation data',
Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28:323-344

Алгоритм працює на матриці розливів отриманим з алгоритму Венга та Ліу. Він проходить по всім точкам матриці і перевіряє чи є потік від поточної точки до вказаної точки на мапі.

2.4. Аналіз площі басейнів

Отже, в попередньому розділі було показано можливість побудови басейнів річок в залежності від порядку. Тепер щоб провести аналіз необхідно мати можливість отримати площу побудованого басейну та побудувати басейни від першого до 9-го порядків, для того щоб зрозуміти залежність розміру басейну від порядку річки.

Оскільки на попередніх кроках були використані растрові операції, то отриманий басейн знаходиться в растрові формі і для того щоб порахувати його площу необхідно перевести його у векторну форму. Для цього можна скористатися інструментом “Raster->Conversion->Polygonize (Raster to vector)”. Даний інструмент покаже меню такого типу:

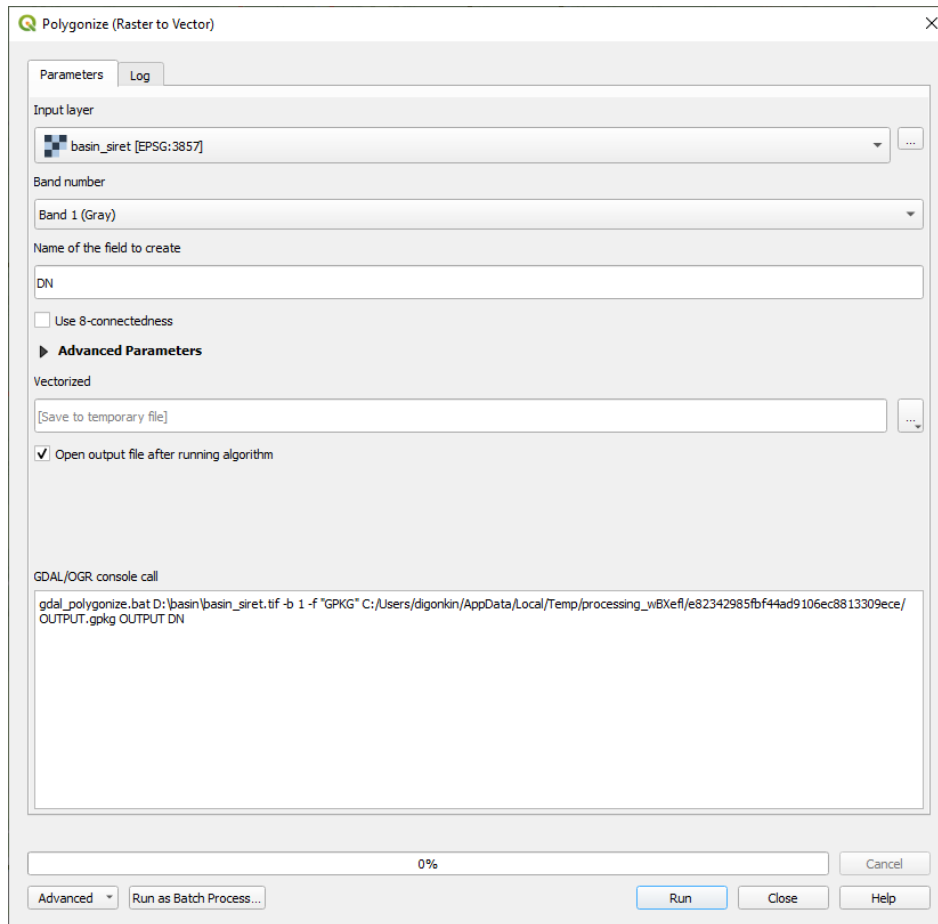


Рисунок 19. Інструмент векторизації полігону

В даному меню необхідно вказати рівень з басейном, отриманий на попередньому кроці та вихідний рівень. В результаті роботи інструменту отримується рівень аналогічний попередньому, але у векторній формі. Клікнувши на ньому виберемо “Attribute table”, а далі “Open field calculator” виберемо тип як decimal та введемо `area($geometry)` у вікно виразів. Дана функція рахує площу фігури в квадратних метрах.

fid	DN	area
1	100	1664723.513671875

Рисунок 20. Калькуляція площі

Отримаємо що площа басейну річки Сірет (однієї з приток) 4-го порядку буде 1664723.513671875 квадратних метрів, або 1.664724 квадратних кілометрів.

Тепер побудуємо та порахуємо площі басейнів річок Сірет та Прут від 1-го до 8-го порядків. Отримаємо наступні результати:

1. Річка Сірет 1-й порядок - 0.012569220703125 квадратних кілометрів

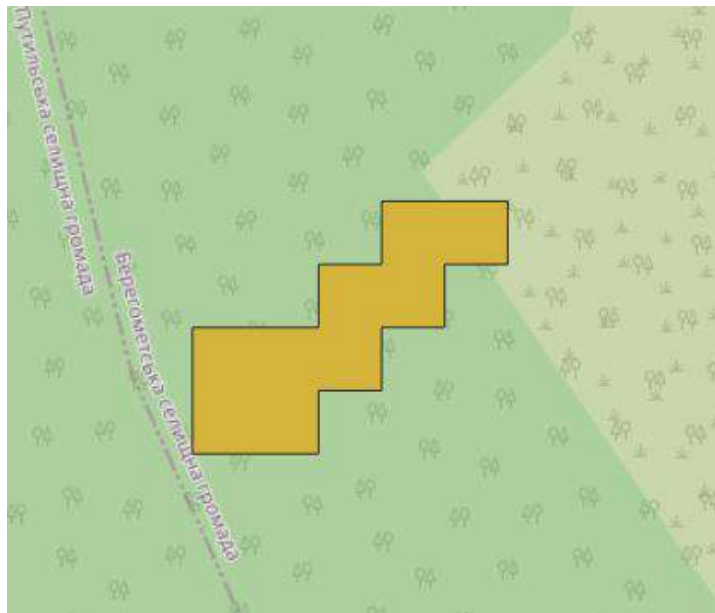


Рисунок 21. Сірет 1-й порядок

2. Річка Сірет 2-й порядок - 0.146640908203125 квадратних кілометрів

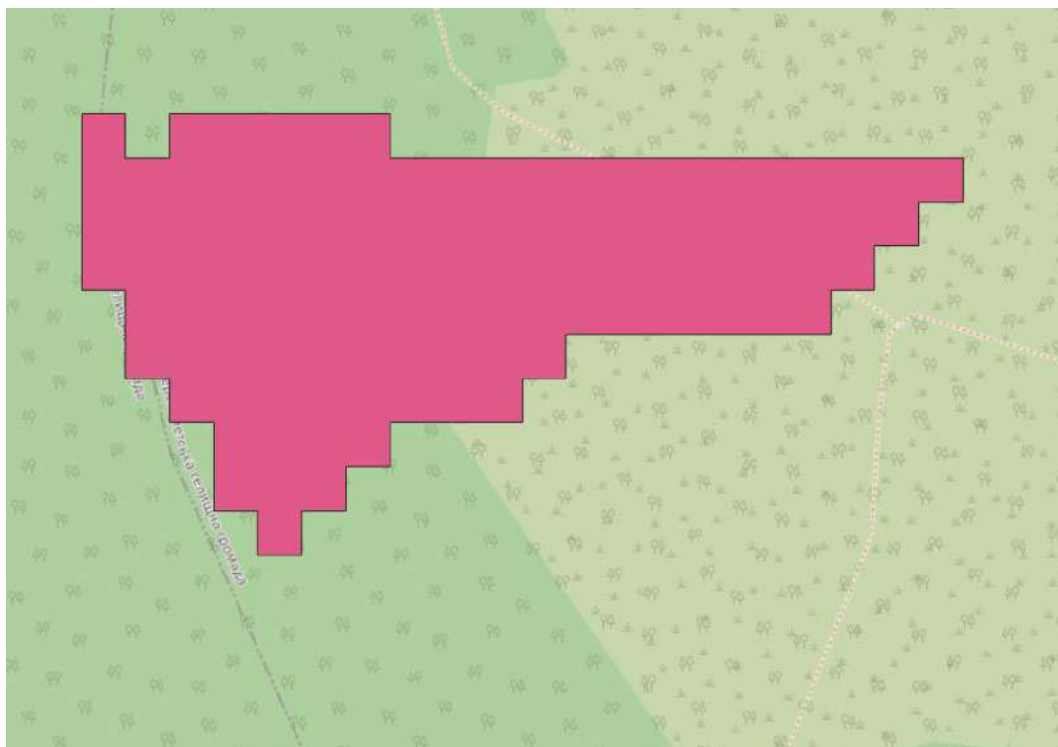


Рисунок 22. Сірет 2-й порядок

3. Річка Сірет 3-й порядок - 0.2779194375 квадратних кілометрів

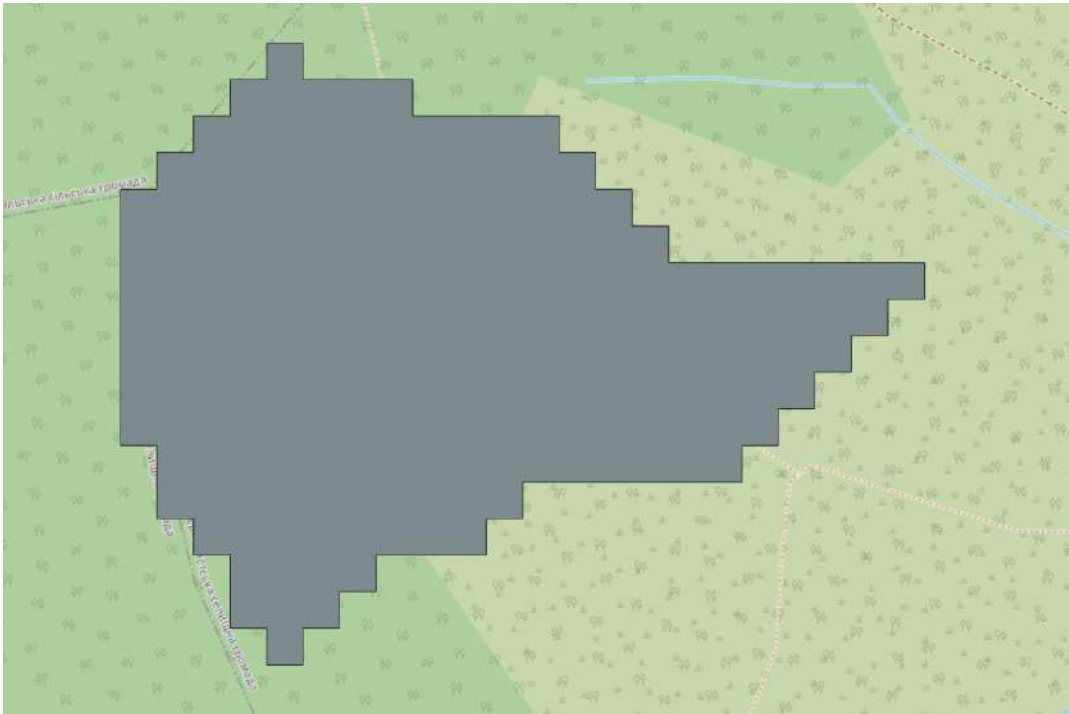


Рисунок 23. Сірет 3-й порядок

4. Річка Сірет 4-й порядок - 1.664724 квадратних кілометрів

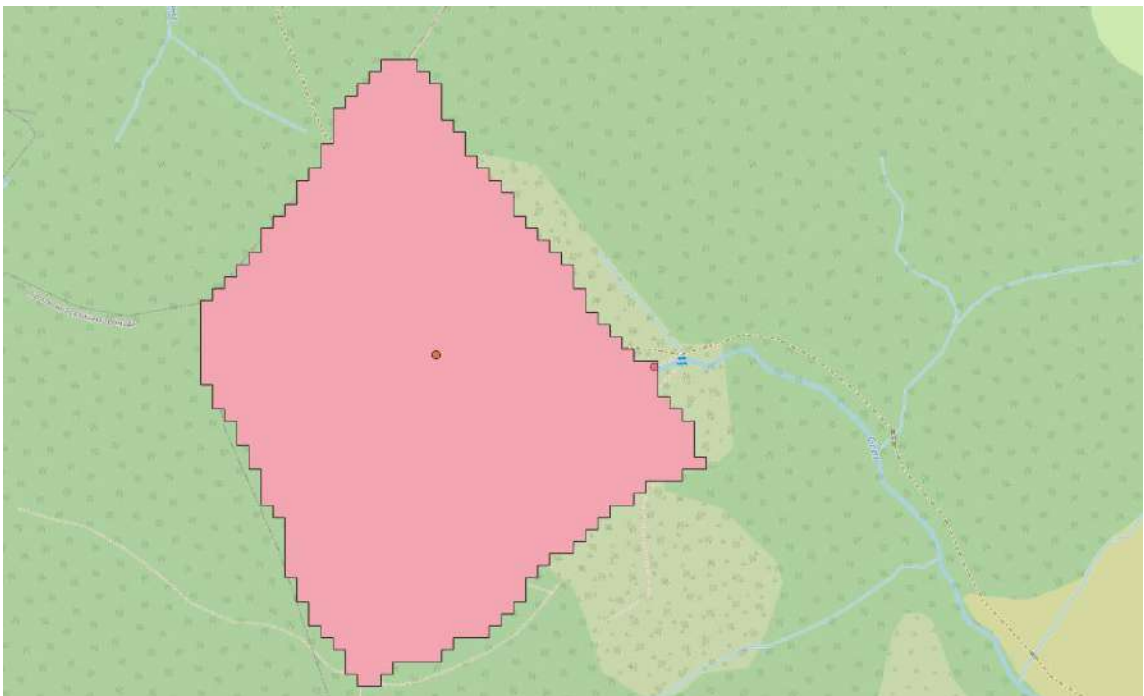


Рисунок 24. Сірет 4-й порядок

5. Річка Сірет 5-й порядок - 6.309749021484375 квадратних кілометрів

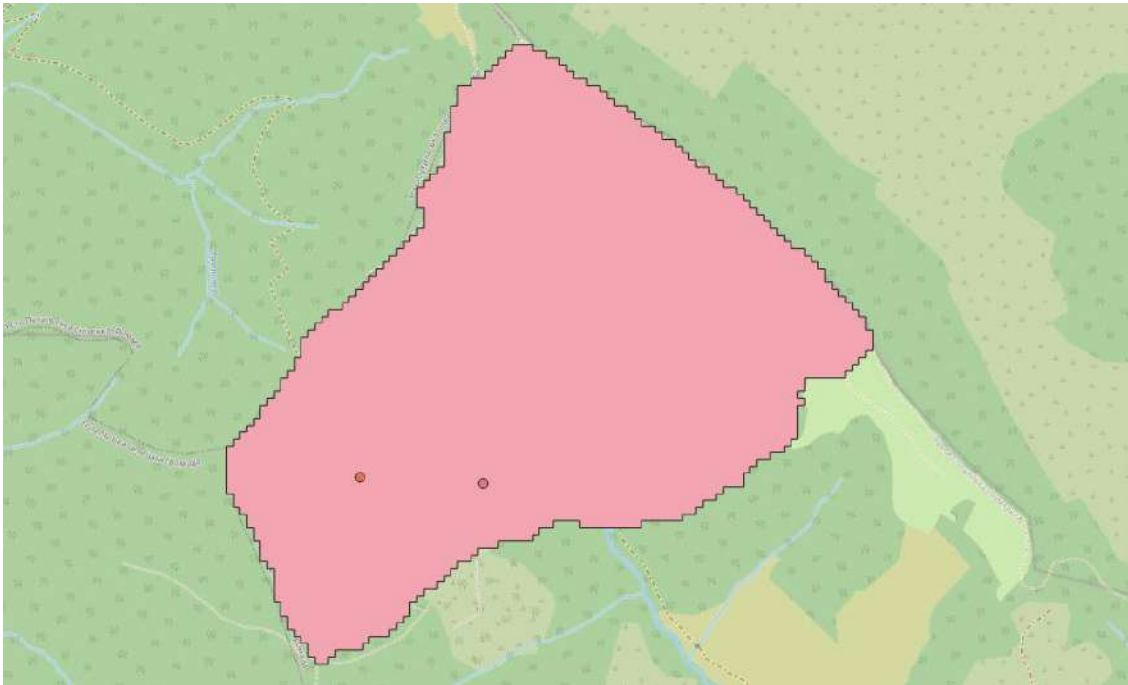


Рисунок 25. Сірет 5-й порядок

6. Річка Сірет 6-й порядок - 32.82521934960938 квадратних кілометрів

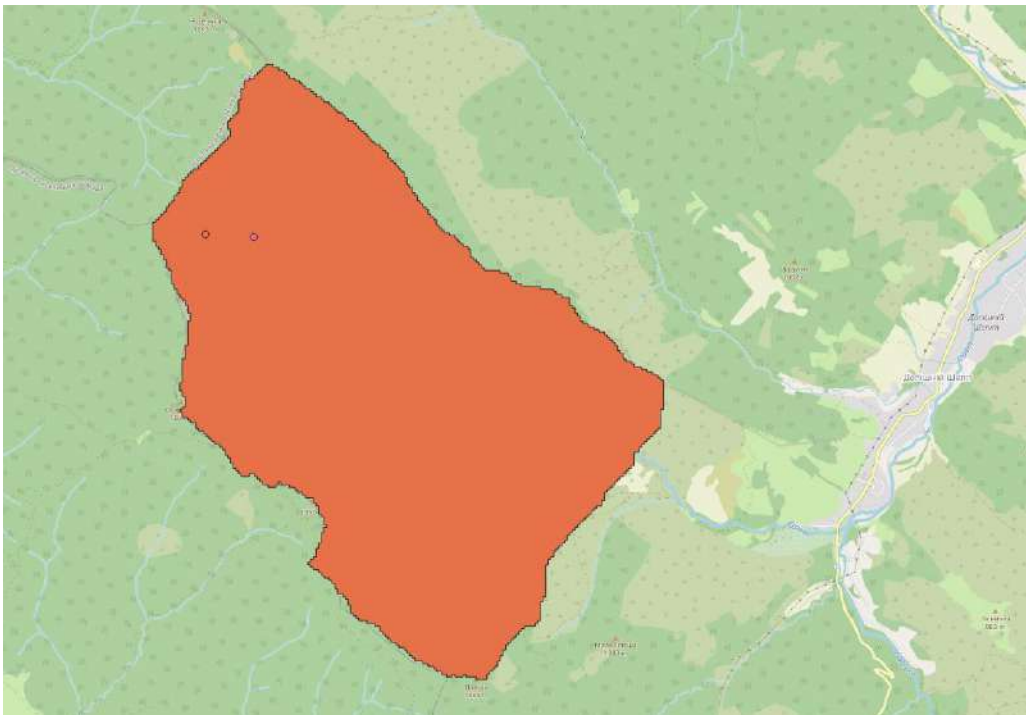


Рисунок 26. Сірет 6-й порядок

7. Річка Сірет 7-й порядок - 113.73888223242187 квадратних кілометрів

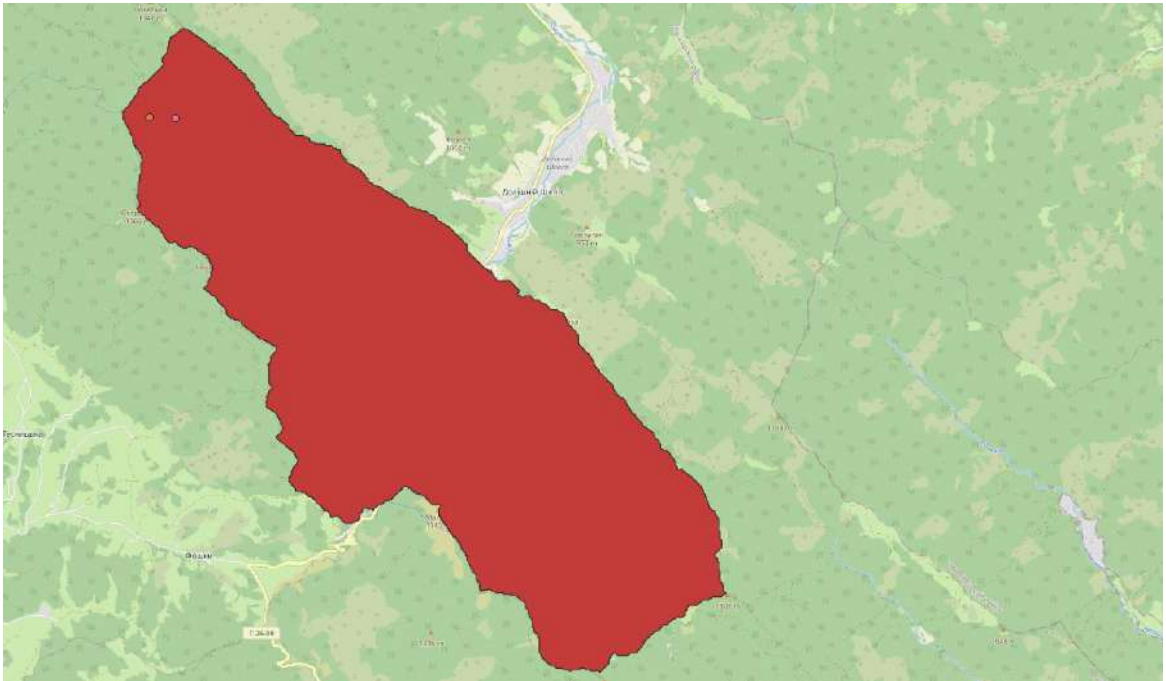


Рисунок 27. Сірет 7-й порядок

8. Річка Сірет 8-й порядок - 1081.536789796875 квадратних кілометрів

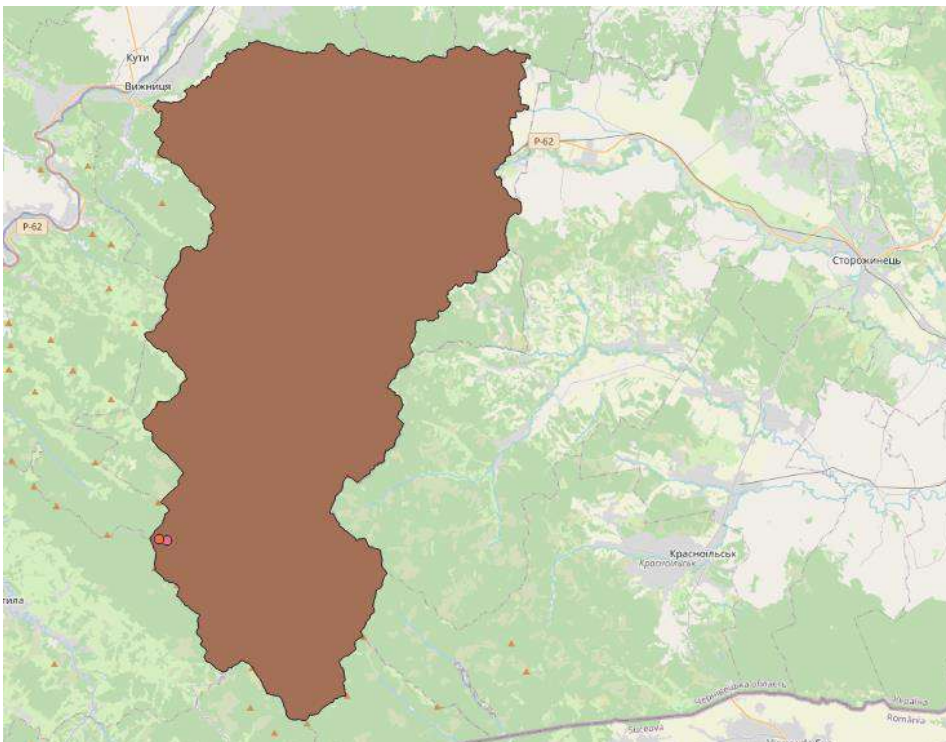


Рисунок 28. Сірет 8-й порядок

9. Річка Прут перший порядок - 0.0125692246093 квадратних кілометрів

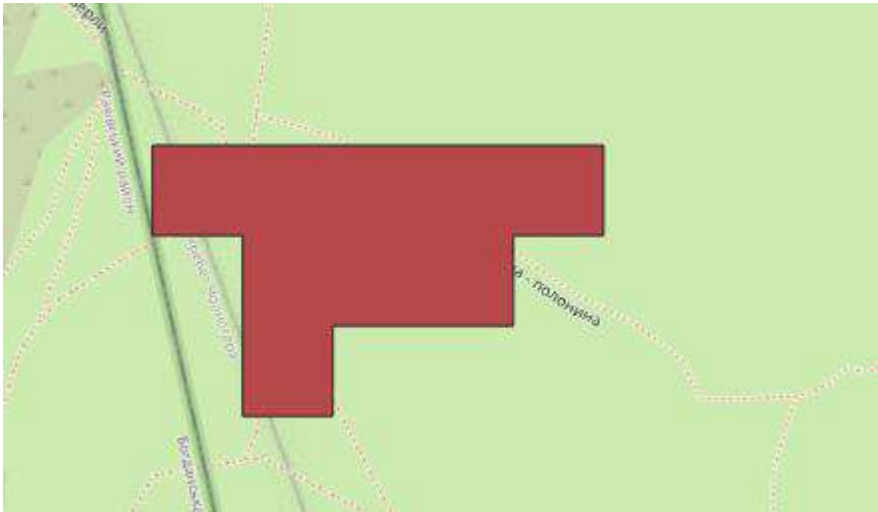


Рисунок 29. Прут 1-й порядок

10. Річка Прут другий порядок - 0.053070046875 квадратних кілометрів

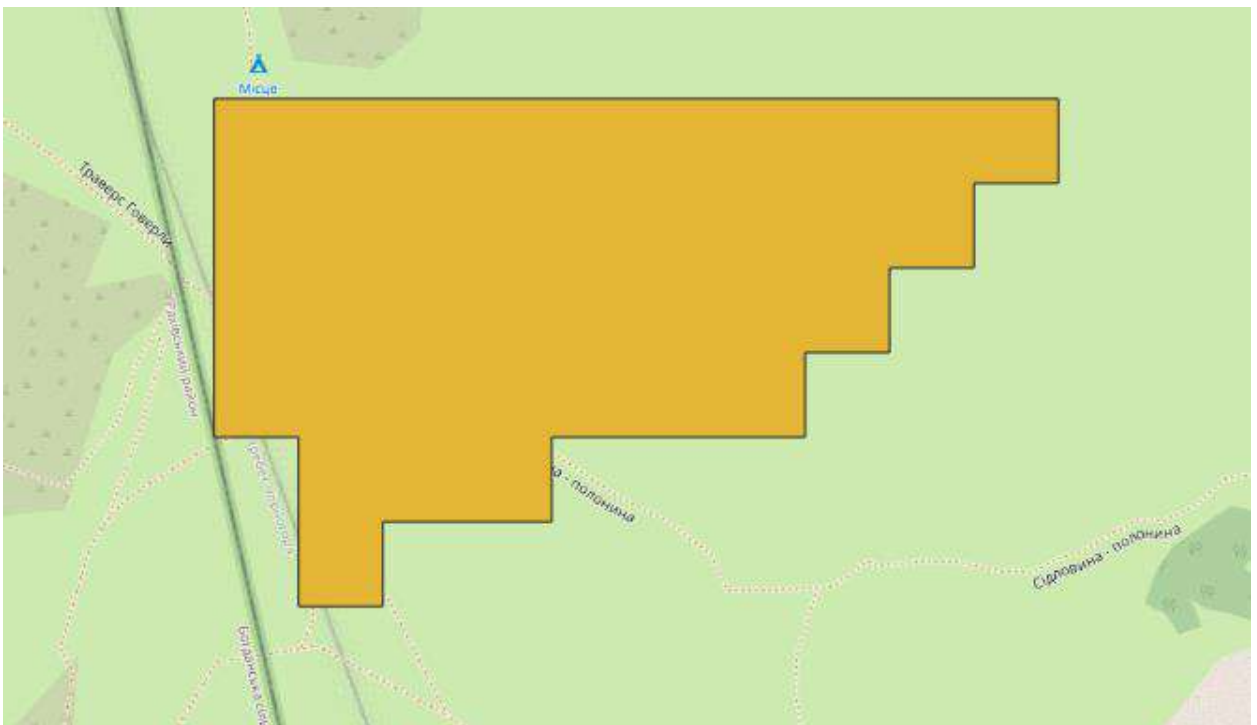


Рисунок 30. Прут 2-й порядок

11. Річка Прут 3-й порядок 0.107536669921875 квадратних кілометрів

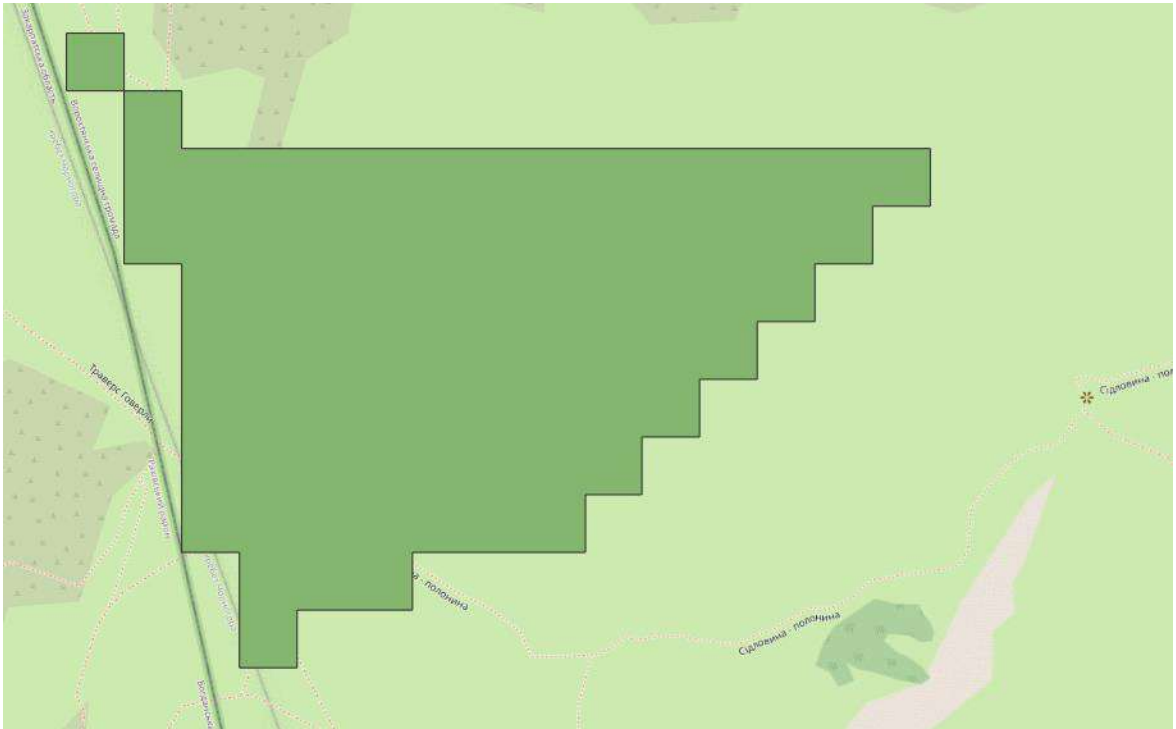


Рисунок 31. Прут 3-й порядок

12. Річка Прут 4-й порядок 2.660485146484375 квадратних кілометрів

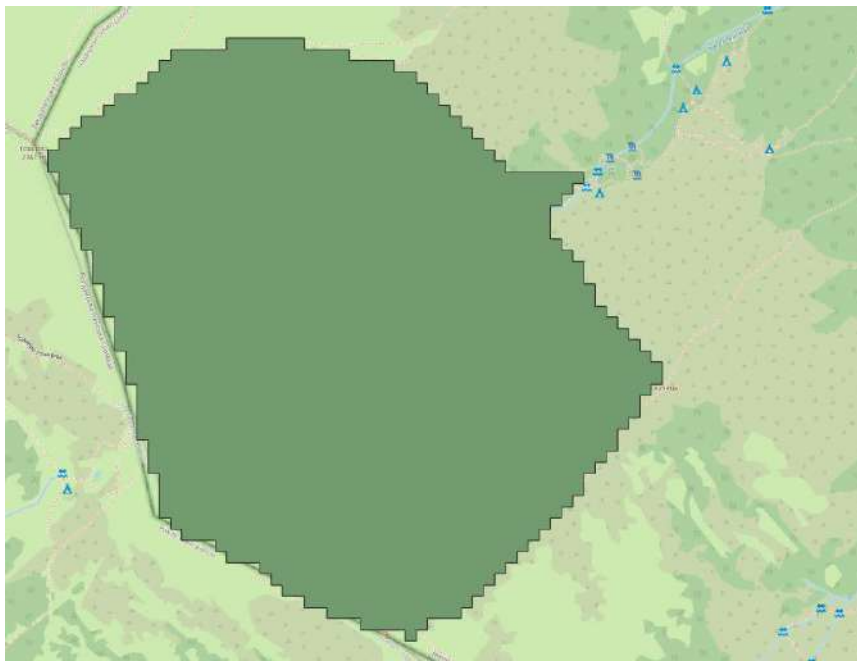


Рисунок 32. Прут 4-й порядок

13. Річка Прут 5-й порядок 8.558243025390626 квадратних кілометрів

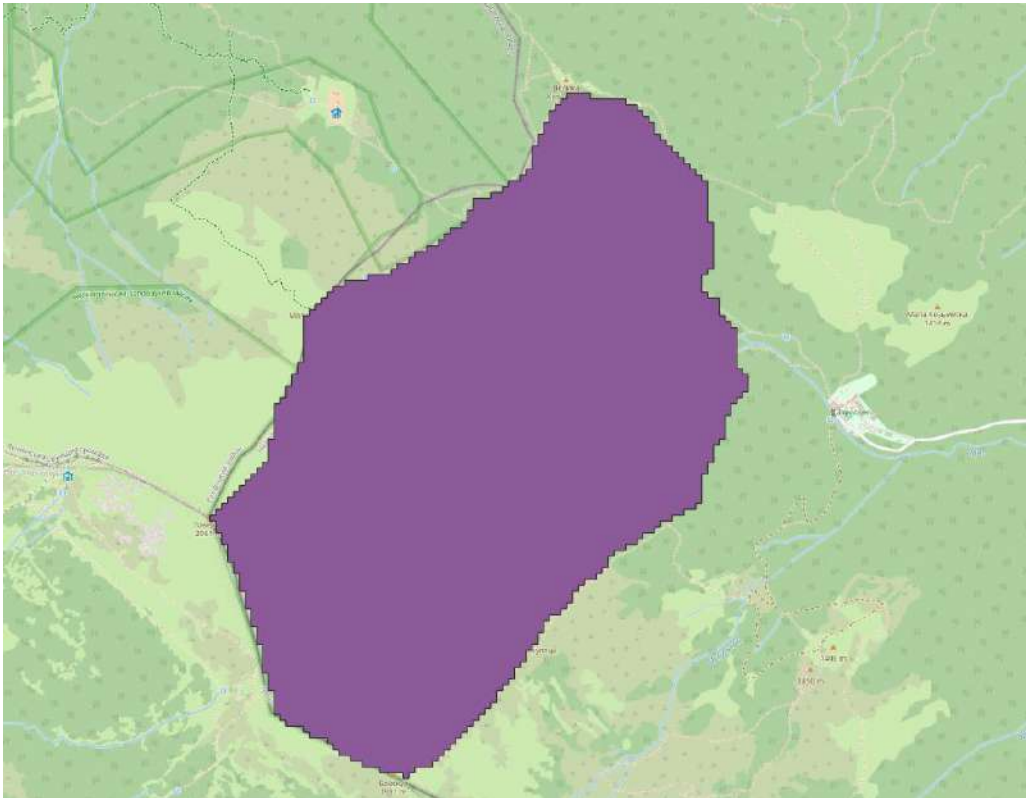


Рисунок 33. Прут 5-й порядок

14. Річка Прут 6-й порядок 45.68772232421875 квадратних кілометрів

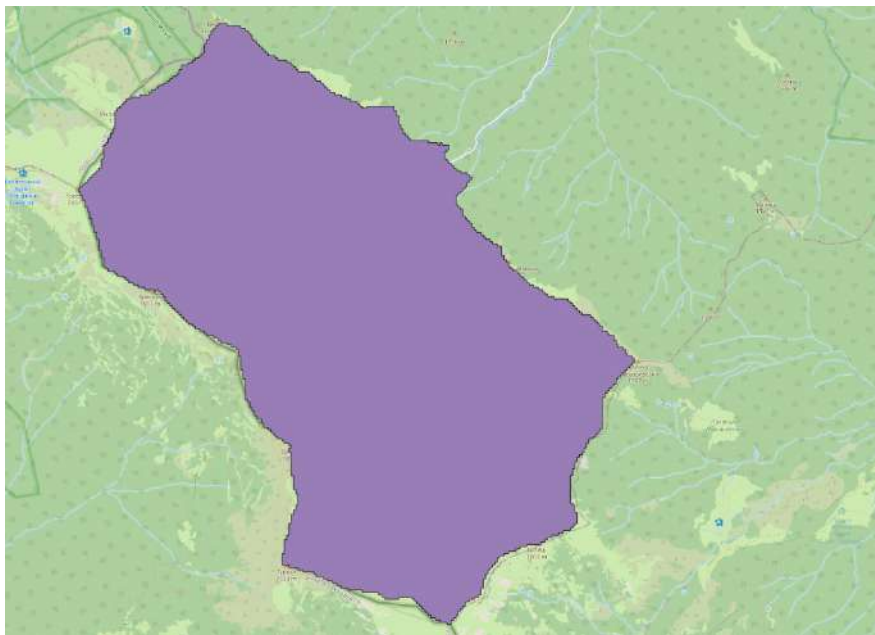


Рисунок 34. Прут 6-й порядок

15. Річка Прут 7-й порядок 403.9468363261719 квадратних кілометрів



Рисунок 35. Прут 7-й порядок

16. Річка Прут 8-й порядок 802.3394734707031 квадратних кілометрів

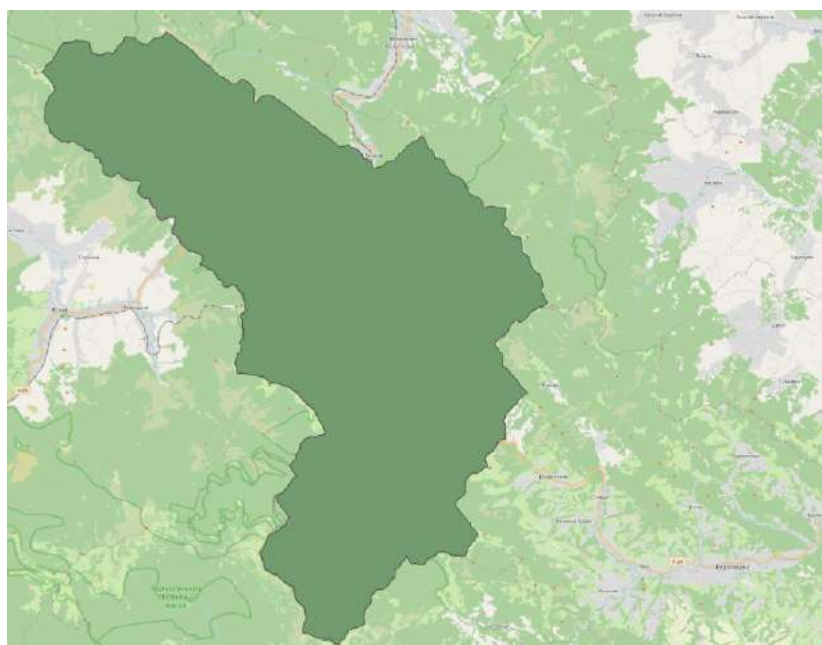


Рисунок 36. Прут 8-й порядок

Тепер переведемо отримані дані в графічну форму:

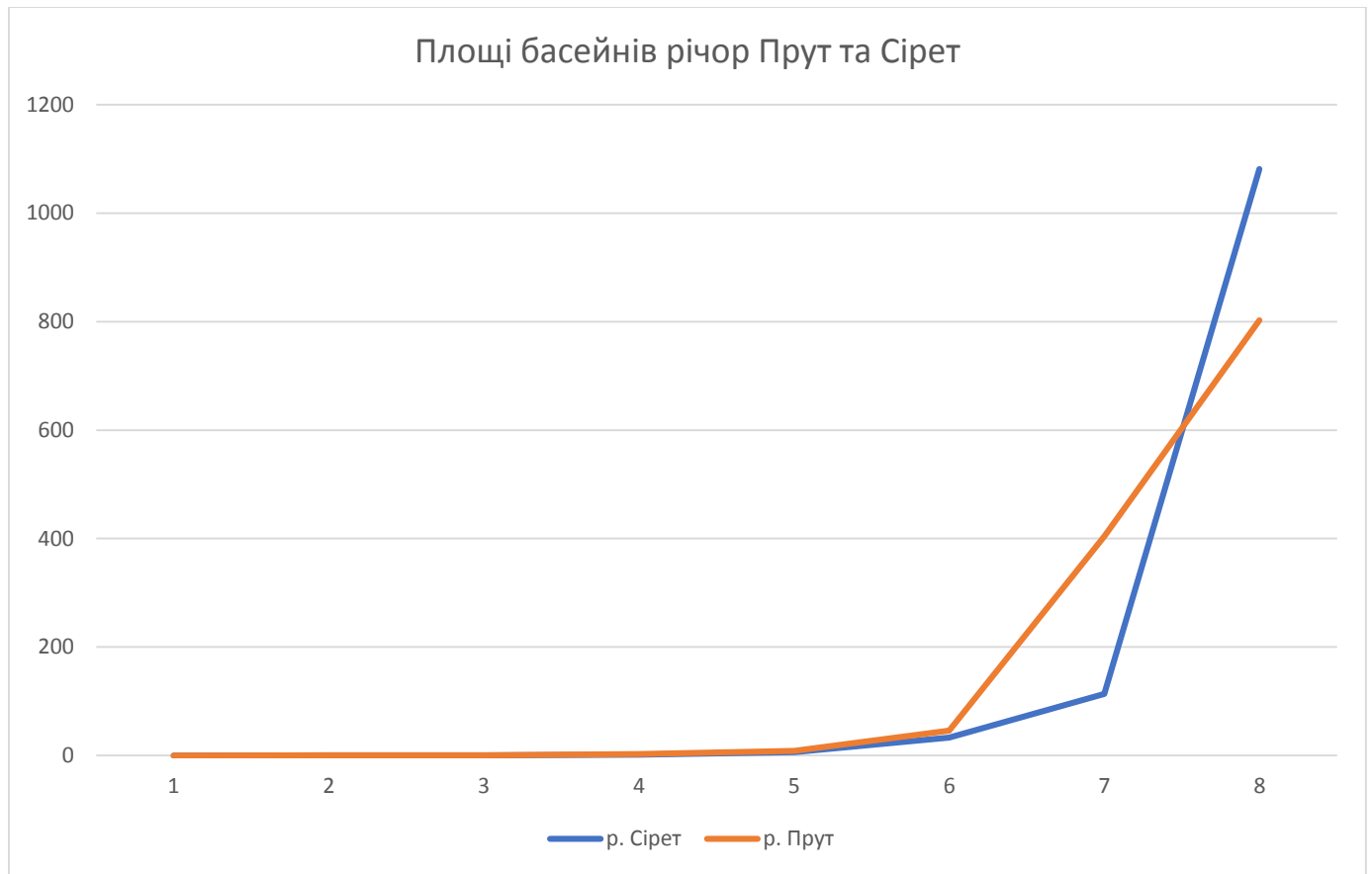


Рисунок 37. Площі басейнів річок прут та Дністер

Отримаємо що площа басейну до 4-го порядку знаходиться в діапазоні до 5 квадратних кілометрів і починає експотенційно зростати на вищих порядках. Збільшення площі басейну приводить до збільшення потоку і відповідно несучої здатності потоку, що приводить до сильніших ерозійних процесів нижче по течії.

2.5. Аналіз щільності

Для того щоб проаналізувати щільність потоків необхідно перевести річкову мережу у векторну форму. Це необхідно робити у декілька етапів.

1. На попередніх етапах при побудові порядків річок в рівні по замовчувані елементи які не містили річку мали значення 0, але для побудови вектору вони мають бути null. Щоб це виправити запускаємо інструмент `r.null`, вказуючи «0» в списку значень:

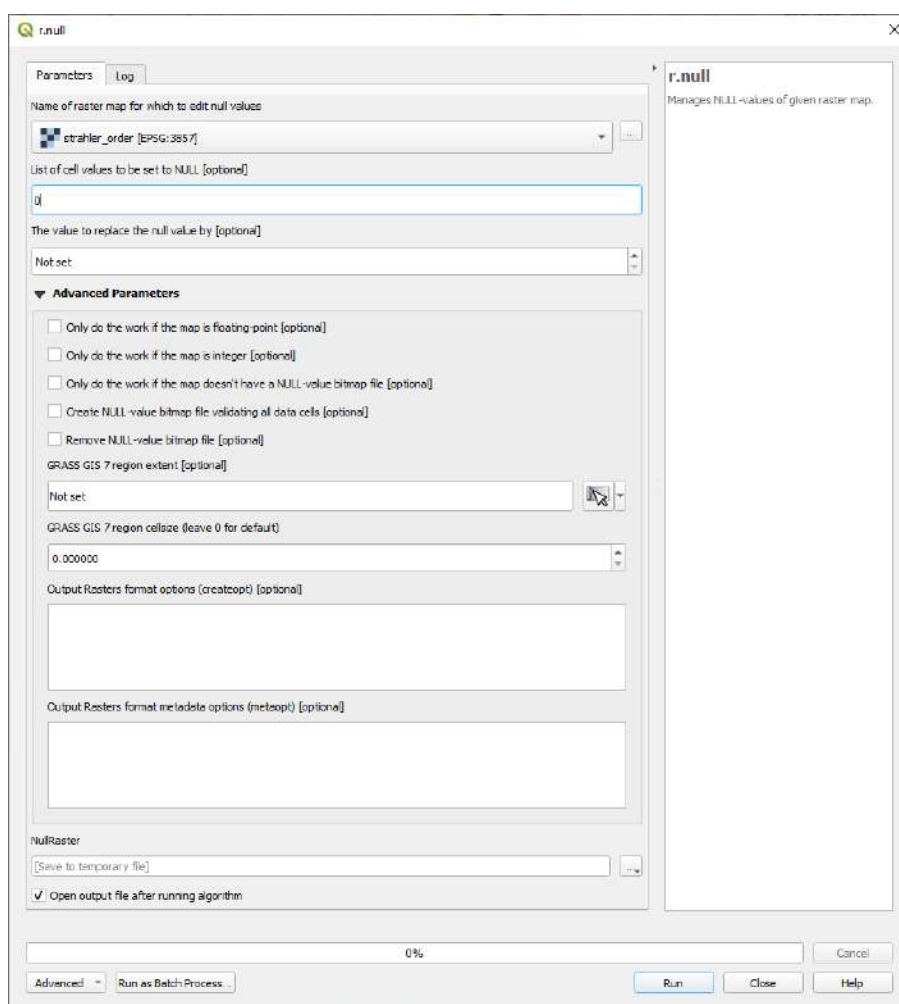


Рисунок 38. Інструмент `r.null`

2. Тепер необхідно прибрати всі артефакти з растрового варіанту. Для цього можемо використати алгоритм потончення, описаний Янгом та

Чін [11]. Цей алгоритм імплементований Ольгою Ваупотіч з лабораторії розробки та дослідження армії США в інструменті r.thin.

Для його використання необхідно задати рівень, отриманий на попередньому кроці, та результуючий рівень:

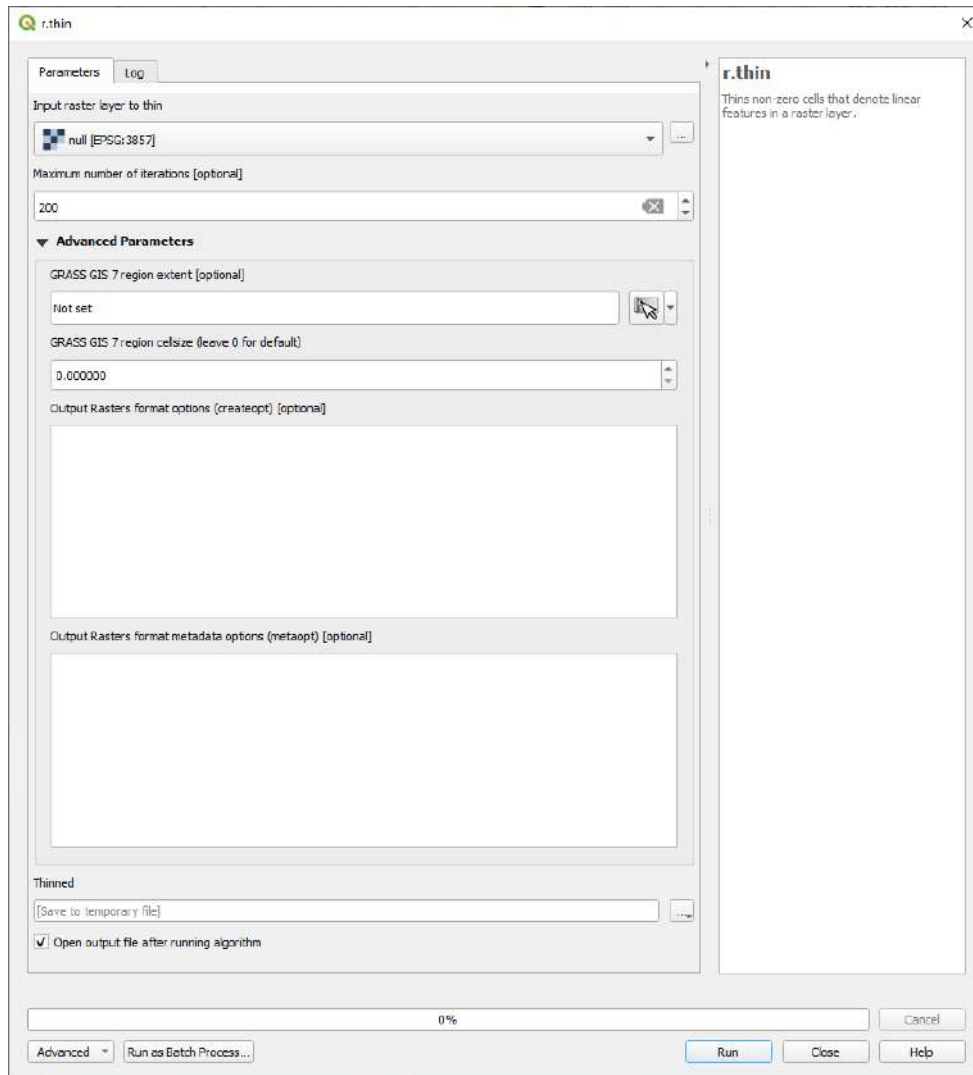


Рисунок 39. Інструмент r.thin

3. На цьому кроці можна приступати власне для векторизації структури річкової системи. Оскільки на попередньому кроці з графа були видалені всі непотрібні точки ми можемо вважати, що кожна точка растру належить векторній репрезентації. Для того щоб це зробити, можемо використати інструмент, написаний Майклом Бабою з DBA

Systems Inc, який називається r.to.vect. Даний інструмент вимагає задати потоншений рівень отриманий, на попередньому кроці, тип фігури (полігон, або лінія - в даному випадку лінія), та, опціонально ділянку, на якій необхідно робити трансформацію. Заповнену форму можемо бачити на рисунку:

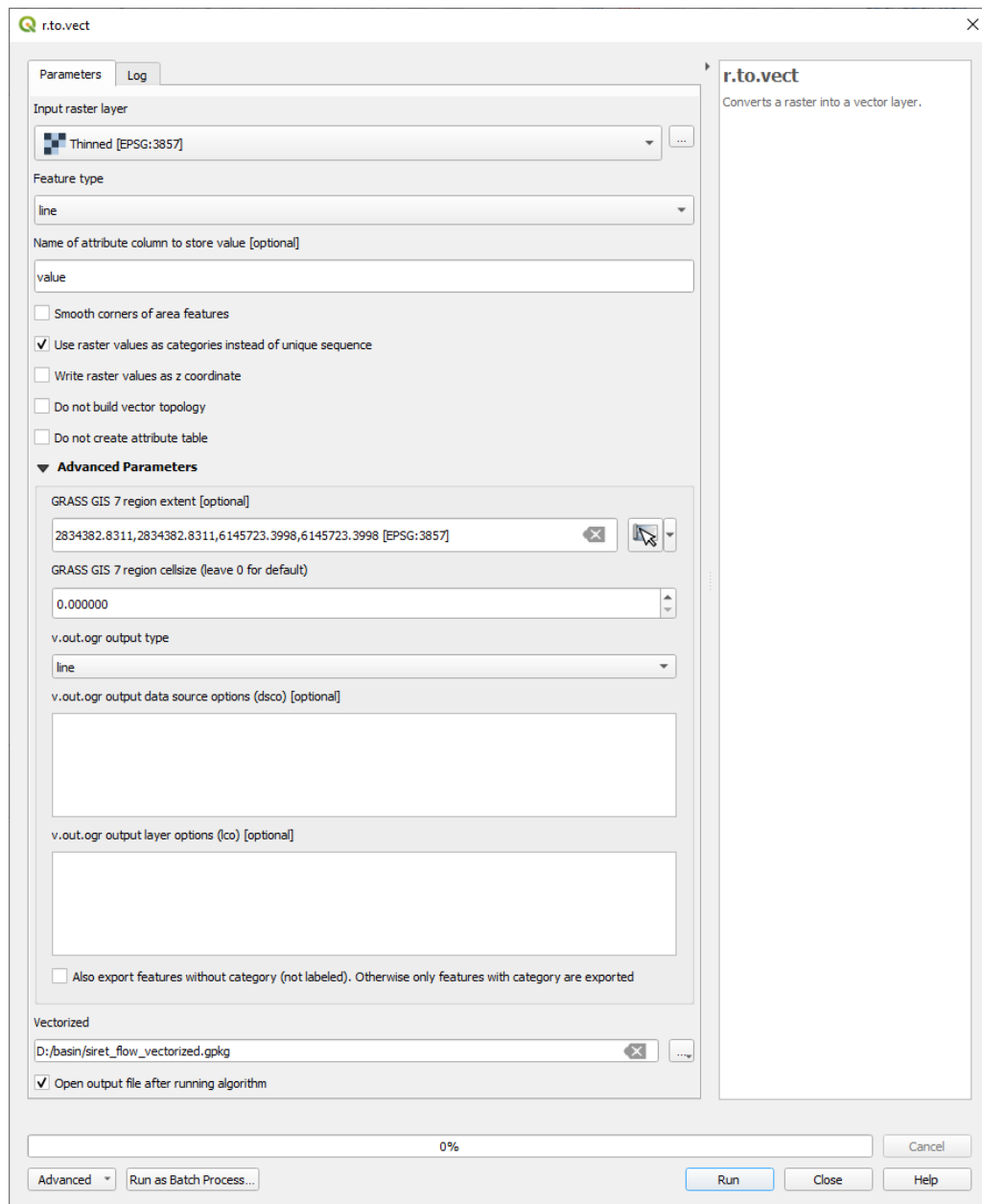


Рисунок 40. Інструмент r.to.vect

Після цього кроку отримаємо такий результат для річки Сірет (на фоні побудованого раніше басейну 8-го порядку):



Рисунок 41. Векторне представлення річки Сірет

Та р. Прут також на фоні побудованого басейну 8-го порядку:



Рисунок 42. Векторне представлення річки Прут

Як видно з рисунку векторизація включає в себе не тільки річки Прут та Сірет, а й інші річки які були у відповідній області. Щоб видалити річки, які ми на разі не досліджуємо. Скористаємось алгоритмами на графах, а саме алгоритмом Дейкстри. Даний інструмент реалізований в інструменті “Service area (from point)”. Інструмент дозволяє знайти вершини графа(орієнтованого, або не орієнтованого) які доступні при деякій найкоротшій відстані. Параметрами інструменту є векторний рівень отриманий на

попередньому кроці, точка на річці (витоку) та очікуєма відстань яку поставимо дуже велику. Параметри можна побачити на наступному рисунку:

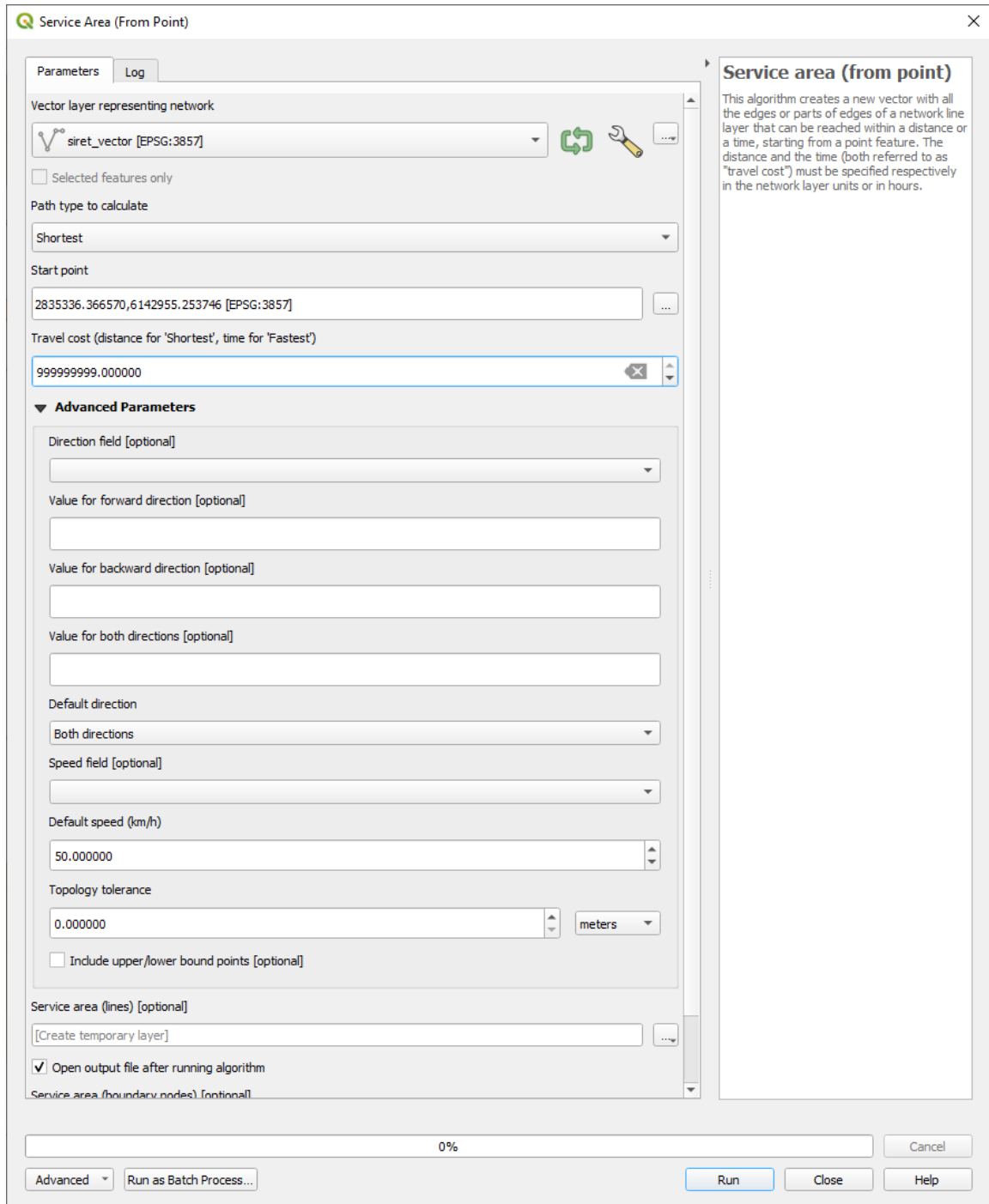


Рисунок 43. Інструмент побудови шляхів

В результаті отримаємо граф, який відповідає річкам Сирет та Прут.

Тепер для того щоб отримати довжину річок в межах попередньо побудованих басейнах по порядкам, необхідно перетнути рівень з басейном з рівнем з графом річки. Для цього існує інструмент Clip, який приймає на вхід рівень з лініями та рівень з полігоном і створює відповідний вихідний рівень:

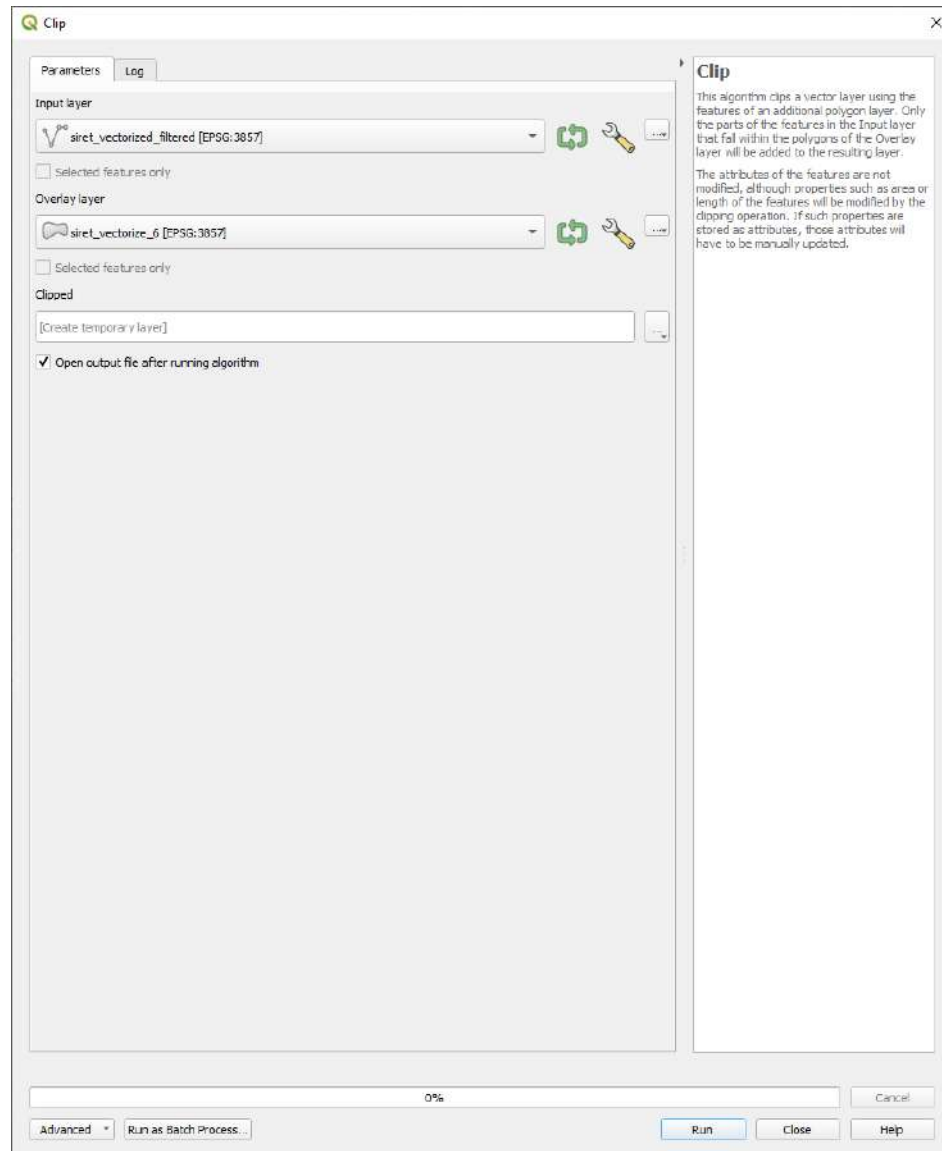


Рисунок 44. Інструмент перетину

Застосувавши даний інструмент отримаємо результуючий рівень для річки Сірет 6-го порядку:

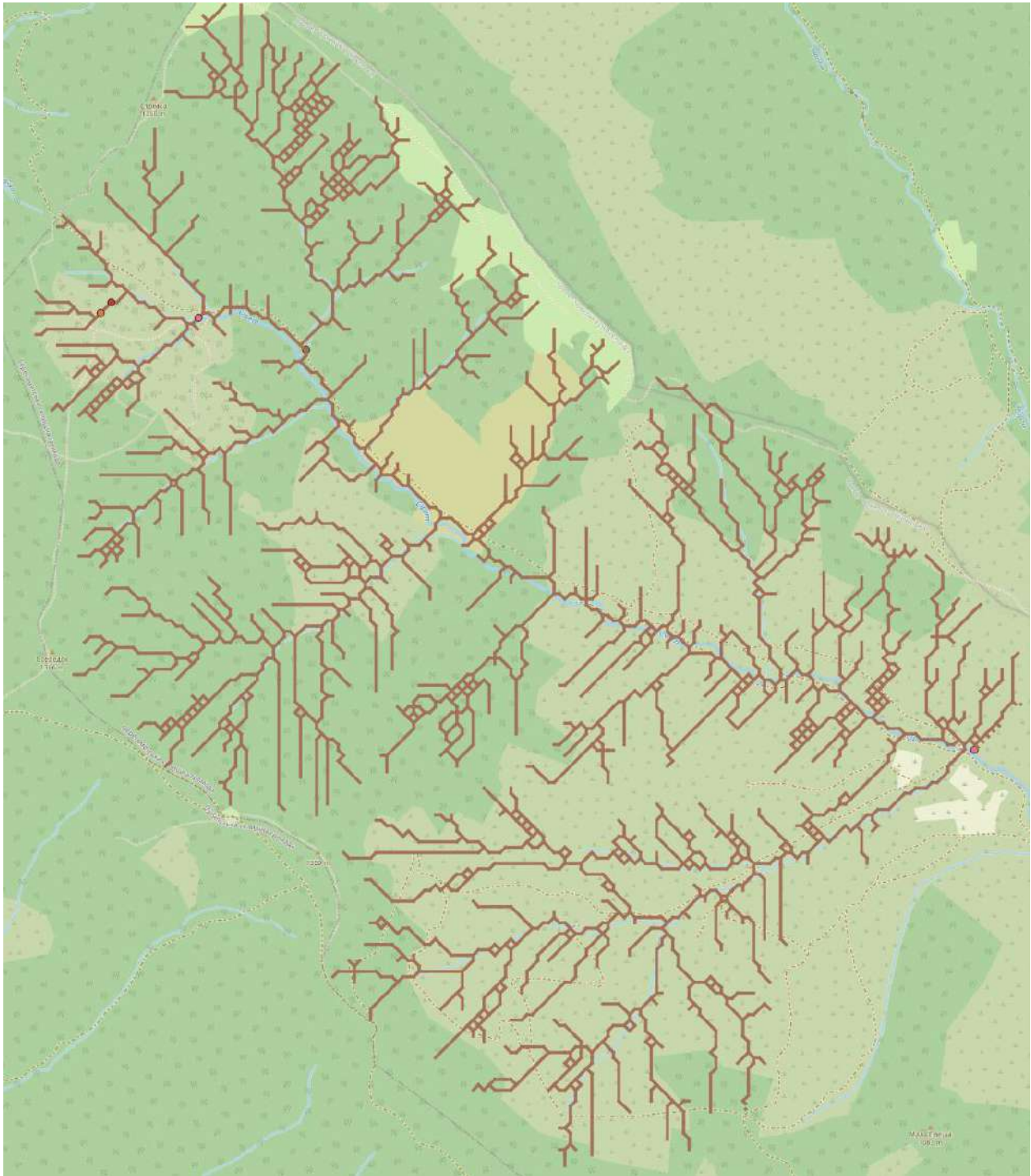


Рисунок 45. Векторне представлення річки Сірет 6-го порядку

Тепер щоб отримати сукупну довжину річки необхідно перейти в “Open Attribute Table” новоствореного рівня та створити нове віртуальне поле десяткового типу зі значенням “\$length/1000” що поверне нам сукупну довжину річки в кілометрах. Наприклад для річки 6-го порядку ця довжина буде: 115.11589898889606 км.

Повторимо дану процедуру для всіх створених на попередніх кроках басейнів. Отримаємо наступні данні:

1. Річка Сірет 1-й порядок: 0.012520339627709244 км.
2. Річка Сірет 2-й порядок: 0.6304821618300176 км.
3. Річка Сірет 3-й порядок: 0.9376358466245794 км.
4. Річка Сірет 4-й порядок: 5,0 км
5. Річка Сірет 5-й порядок: 21.9188 км.
6. Річка Сірет 6-й порядок: 115.116 км.
7. Річка Сірет 7-й порядок: 393.853 км.
8. Річка Сірет 8-й порядок: 3637.0371213469393 км.
9. Річка Прут 1-й порядок: 0.0124887640539585 км.
10. Річка Прут 2-й порядок: 0.17340182306920215 км.
11. Річка Прут 3-й порядок: 0.4488289381734239 км.
12. Річка Прут 4-й порядок: 9.375844138650368 км.
13. Річка Прут 5-й порядок: 30.505771133858264 км.
14. Річка Прут 6-й порядок: 166.90117736722073 км.
15. Річка Прут 7-й порядок: 1361.2988803104508 км.
16. Річка Прут 8-й порядок: 2684.5306624565515 км.

Отримавши всі дані ми можемо занести їх в таблицю разом з даними про розміри басейнів, та порахувати щільність річкової системи для річок відповідних порядків.

Для річки Прут:

Порядок річки	Площа басейну, квадратні кілометри	Довжина річкової системи, кілометри	Щільність, кілометри/квадратні кілометри
1	0.0126	0.0125	0.993598606
2	0.0531	0.1734	3.267414168
3	0.1075	0.4488	4.173729189
4	2.6605	9.3758	3.524110687
5	8.5582	30.506	3.564489936
6	45.688	166.9	3.653085969
7	403.95	1361.3	3.369995153
8	802.34	2684.5	3.345878835

Для річки Сірет:

Порядок річки	Площа басейну, квадратні кілометри	Довжина річкової системи, кілометри	Щільність, кілометри/квадратні кілометри
1	0.0126	0.01248876	0.993598915
2	0.1466	0.63048216	4.299497115
3	0.2779	0.93763585	3.37376851
4	1.6647	5	3.003500881
5	6.3097	21.9188	3.473799025

6	32.825	115.116	3.506937723
7	113.74	393.853	3.462782404
8	1081.5	3637.03712	3.362841797

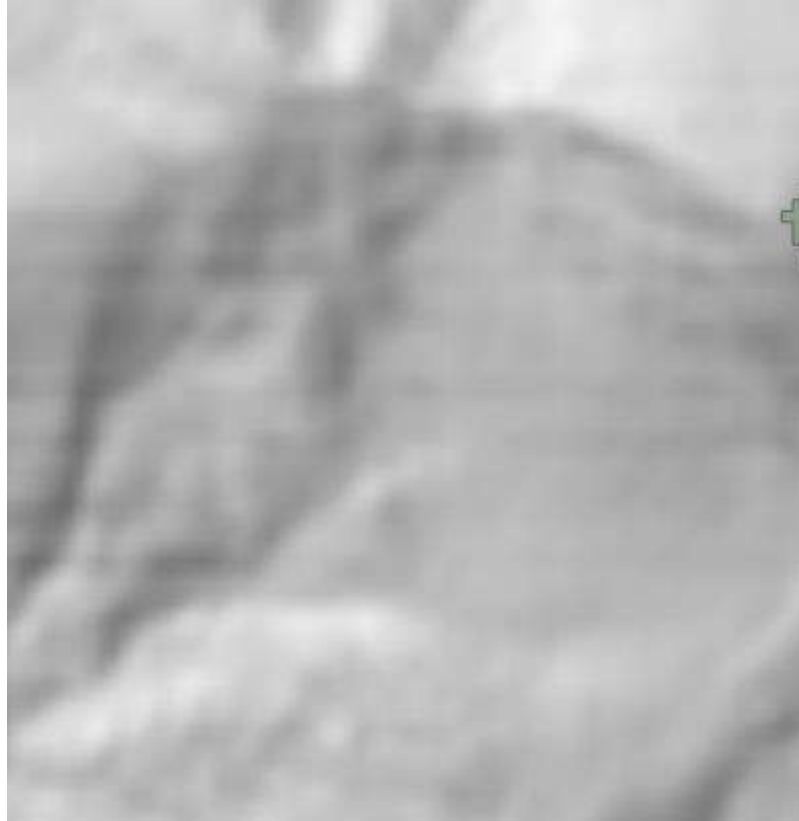
Отже, ми отримуємо, що довжина річкової системи практично однаково зростає з величиною басейну, та що виходячи, з отриманих даних, щільність річкової системи не залежить від порядку річки. Також з даних бачимо що басейн першого порядку відрізняється від інших басейнів, що може бути пов'язано з якістю та точністю даних та алгоритмів.

Проаналізуємо перетворення які ми робили з даними і похибки, які відбувалися при кожному перетворенні. Під час знаходження довжини річки відбувалися такі перетворення:

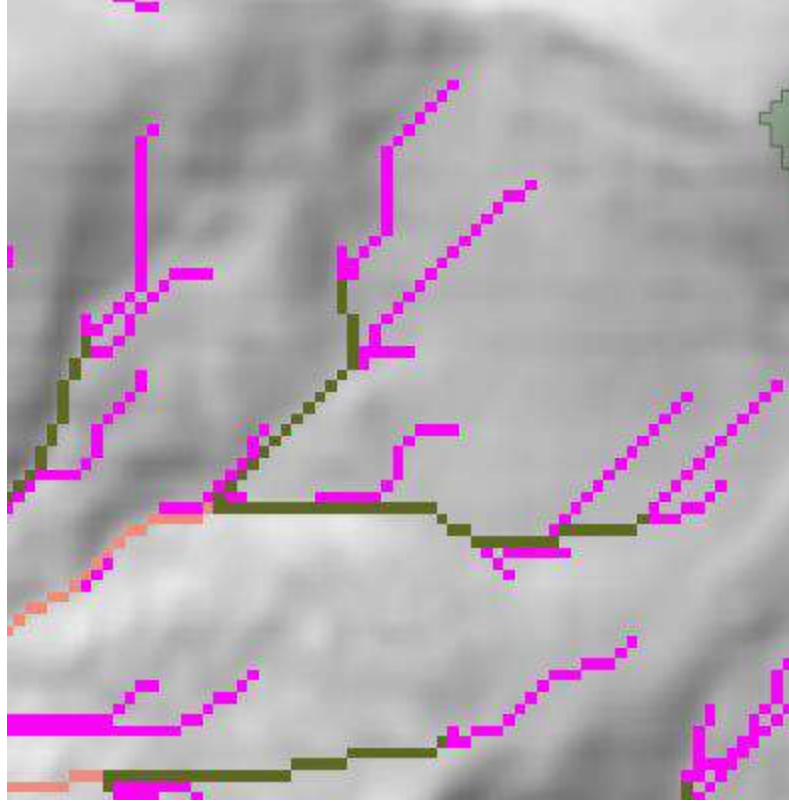
1. З реального рельєфу супутник за допомогою своїх інструментів знімав модель рельєфу. Це є основною операцією точність якої не можливо визначити без високоточних вимірювань на місцевості. Хоча, можемо побачити за результатами попереднього розділу, що знімки з Л діапазону дають дещо інший результат, особливо для річок першого та другого порядку.
2. З моделі рельєфу ми визначали річки та її порядок фактично за означенням порядку річок за Штралером: алгоритм шукав схили, і на перетині двох схилів малював річку першого порядку. Проблема такого підходу заключається в тому що схили не завжди гомогенні, а особливо знімки цих схилів можуть продукувати мікро схили, які, в результаті дадуть фантомну річку. З цим можна боротись згладжуючи рельєф перед побудовою стоку, але без досліджень на місці буде складно

підібрати необхідні параметри. Фантомні річки ми можемо спостерігати на такому прикладі:

Візьмемо наприклад такий фрагмент початку річки при максимальному наближенні даних з супутника:



На цьому малюнку ми можемо розгледіти річища, але алгоритм маркує ці річища як річища 3-го порядку. Розглянемо цей самий фрагмент, але з позначеними річками третього(рожеве), четвертого(зелене) і п'ятого (помаранчеве) порядків:

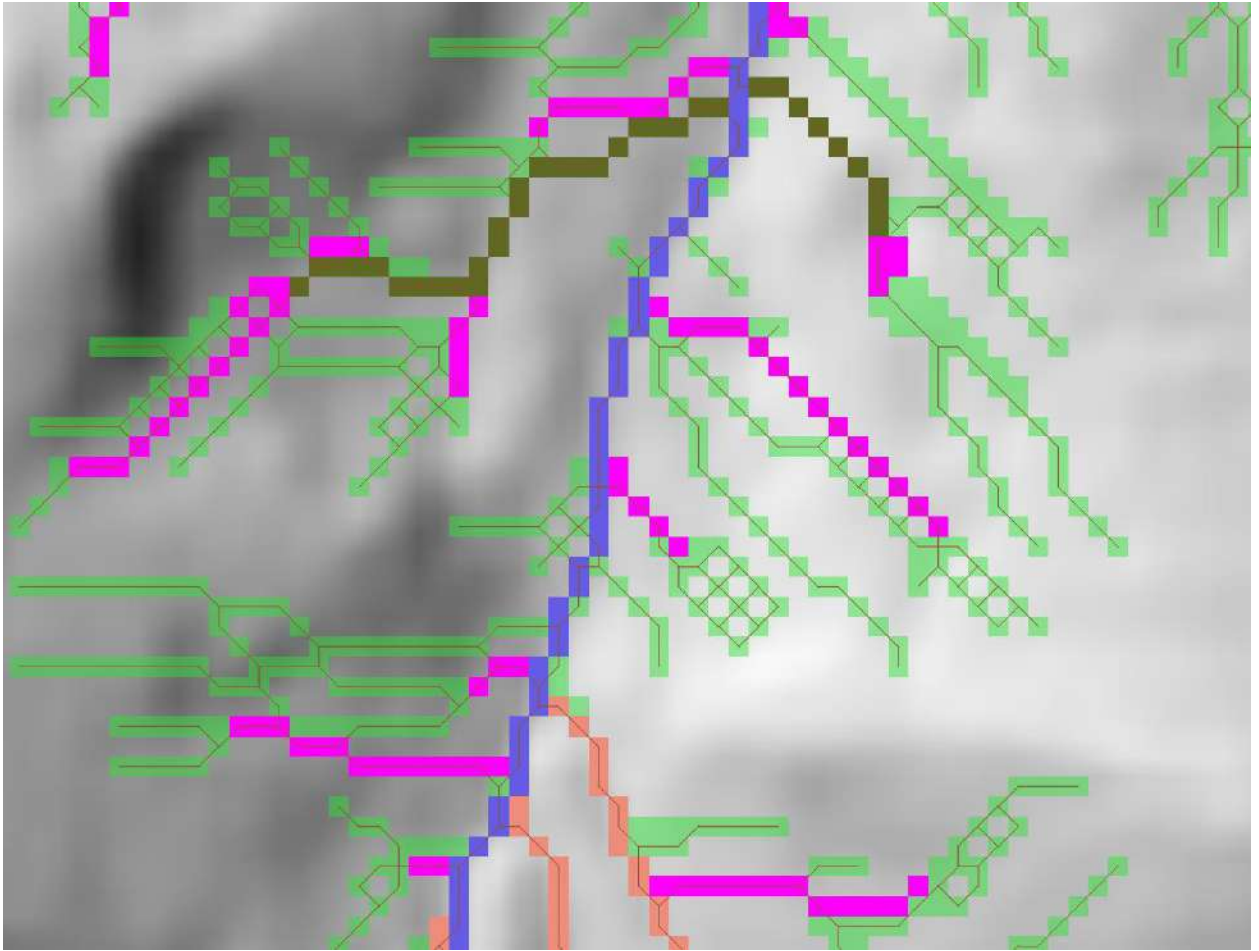


Як бачимо, роздільна здатність на цій ділянці є не достатньою для точного визначення річок менших порядків. Також є можливість того, що річки знайдені, як 3-й порядок є, насправді річками першого порядку, або те, що визначення порядку річки як річки між двома схилами не має сенсу з математичної точки зору. Відповідь на ці питання дадуть дослідження на місцевості.

Крім переліченого на точність моделі також будуть впливати такі фактори:

1. Отримана модель рельєфу буде включати деякі види рослинності і антропогенну діяльність, навіть використовуючи дані отримані за допомогою інструментів, які працюють в L діапазоні хвиль.
2. Отримана модель рельєфу не включає тип ґрунту, який знаходиться в місці вимірювання, тому в разі якщо вода буде вільно

- просочуватись в ґрунт – річку не можна буде спостерігати на поверхні.
3. Модель також не враховує кількість опадів та кількість води, яка буде затримана рослинністю що росте на даній місцевості.
 4. Точність даних, отриманих різними інструментами може бути різною в різних частинах світу, тому є невідомим на скільки отримані супутникові знімки відповідають дійсності
3. Оскільки супутникові знімки растрові, тобто такі, що представляється масивом пікселів, кожен з яких має визначене значення висоти, що використовується для утворення знімку – ми будуємо модель річки, яка також представлена масивом пікселів. Такий формат, є нормальним для базового аналізу, але для того щоб вимірювати параметри річкової системи, та проводити глибший аналіз – доцільно переводити модель у векторну форму. Використанні в даній роботі для цього алгоритми теж мають деяку похибку. Наприклад в такому разі ігнорується ширина річища. Також, оскільки знімок супутника має деяку точність, то дві сусідні річки можуть з'єднуватися в одну у векторній моделі. Це можна побачити на рисунку:



Як бачимо річища другого і третього порядку є змішаними, оскільки для алгоритму вони знаходяться по діагоналі і, тому є частинами одного річища. Збільшення точності знімків і виявлення річок може виправити дану проблему.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було застосовано комп'ютерні технології, а саме, геоінформаційну систему QGIS, для побудови моделі річкової системи і вивчені порядкової структури річкових систем. Акцент робився на річках малих порядків на прикладі річок Прут та Сірет.

Було проаналізовано, як маючи цифрову модель рельєфу отриману зі супутників, за допомогою сучасних засобів моделювання досить легко змоделювати річкову систему. Як будь яке моделювання дане моделювання відображає реальність в деякому наближенні.

Також в даній роботі була показана можливість аналізу моделі річкової системи, яка була побудована на супутникових знімках, зокрема було показано зв'язок площі басейну, довжини річкової системи та щільності річкової системи від порядку річки. Та було дану можливу відповідь чому на 4-5 порядку відбувається перехід від хоричного до регіонального рівня організації річкової системи.

Було розглянуто фактори, які впливають на точність проведених досліджень, та було запропоновані шляхи їх вирішення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Світличний О.О., Плотницький С.В. Основи геоінформатики
2. Опис інструменту Призм на офіційному сайті Японського космічного агентства. URL: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/alos/sensor/prism_e.htm (дата звернення: 01.11.2023)
3. J. R. Santillana, M. Makinano-Santillan VERTICAL ACCURACY ASSESSMENT OF 30-M RESOLUTION ALOS, ASTER, AND SRTM GLOBAL DEMS OVER NORTHEASTERN MINDANAO, PHILIPPINES, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B4, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic
4. Мапа висот ASTER. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> (дата звернення: 01.11.2023)
5. Мапа ASTER GDEM підвищеної точності. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/news/new-aster-gdem> (дата звернення: 01.11.2023)
6. Ющенко Ю. С. Загальна гідрологія : підручник. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2017. 591 с
7. Опис подачі документів для отримання доступу до можелі даних підвищеної точності. URL: <https://tandemx-science.dlr.de/cgi-bin/wcm.pl?page=TDM-Proposal-Submission-Procedure> (дата звернення: 01.11.2023)
8. Опис інструменту SAR на офіційному сайті NASA. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar> (дата звернення: 01.11.2023)

9. L. WANG and H. LIU, An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling, *International Journal of Geographical Information Science* Vol. 000, No. 000, 0 Month 2005, 1–21
10. Гродзинський М.Д. Пізнання ландшафту: місце і простір: у 2 т. К., 2005. Т.1. 431 с
11. Ben-Kwei Jang and Ronald T. Chin in *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, No. 6, June 1990

ДОДАТКИ

Додаток 1. Алгоритм Венга та Ліу

В даному розділі буде наведений стислий опис алгоритму Венга та Ліу, з повним описом алгоритму і доведенням його ефективності можна ознайомитися в оригінальній роботі[9].

Алгоритм вводить поняття розлив. Розливом будемо називати мінімальну висоту, на яку необхідно підняти ділянку, щоб вода з неї «вилилась» за межі заданої ділянки. Продемонструємо це на прикладі двох вимірною рельєфу для простоти

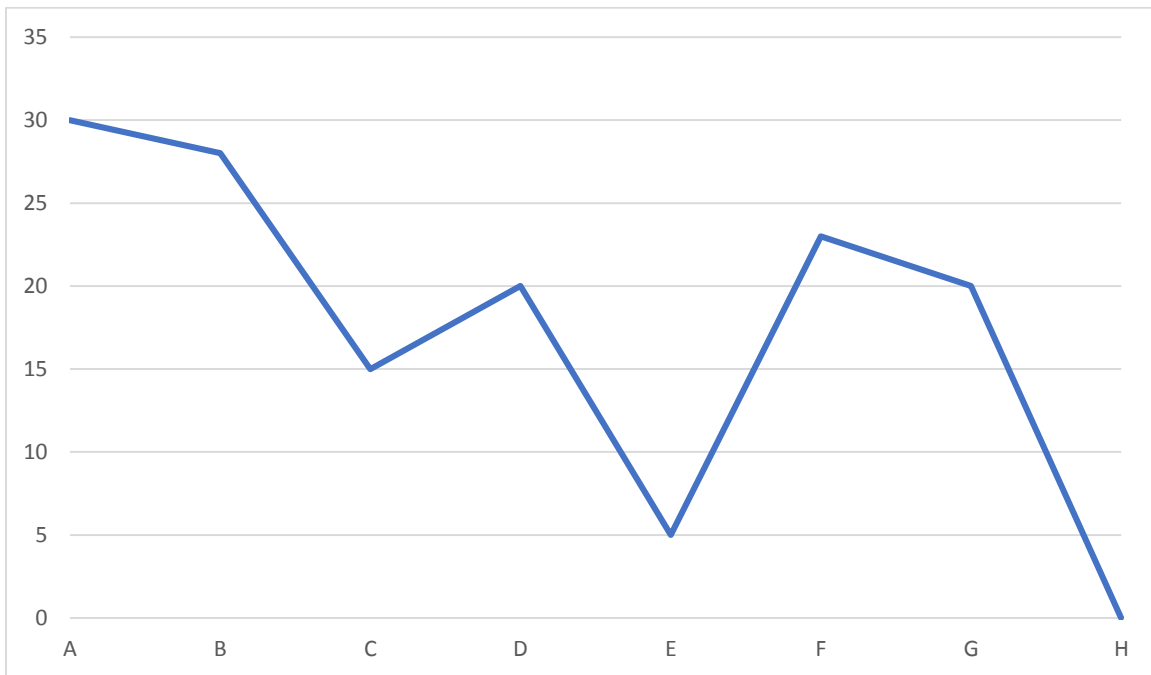


Рисунок 46 Мапа висот

Будемо починати з вершини H, оскільки ця вершина має найменшу висоту(0). Для вершин F та G висота вершини буде співпадати з розливом вершини, оскільки вода «налита» на ці вершини буде «вилитися» за межі ділянки.

Для вершин E, D, C розлив буде дорівнювати розливу вершини F. Тобто, отримаємо наступний рельєф, враховуючи розлив:

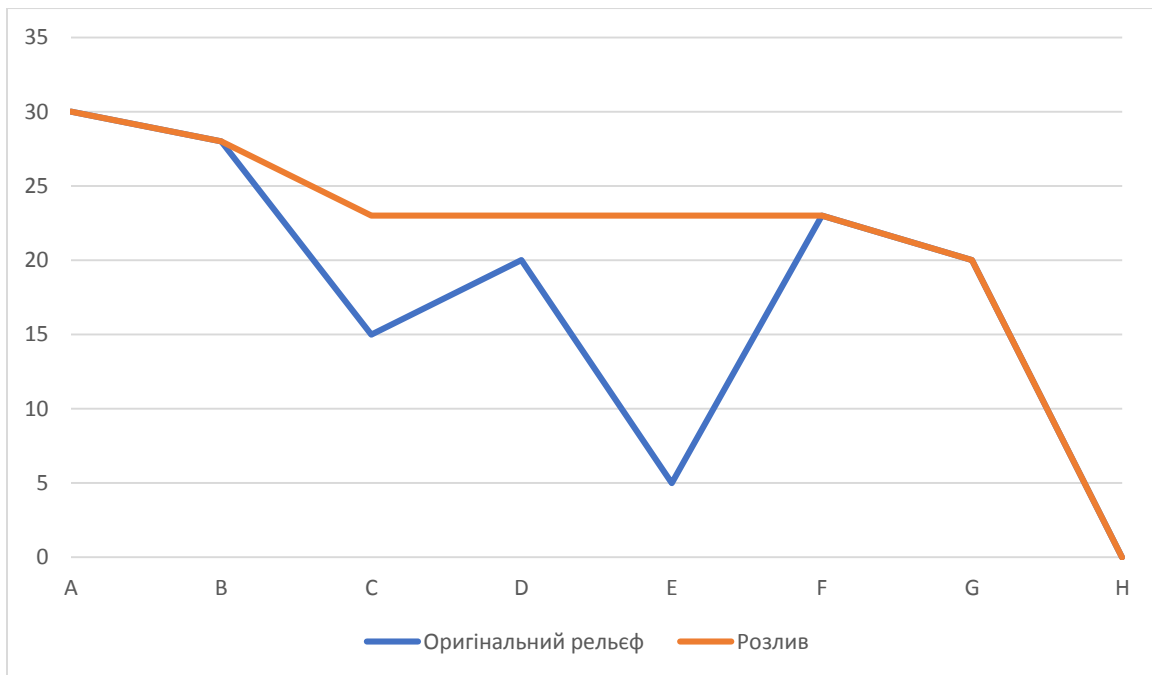


Рисунок 47 Мапа висот з розливом

Алгоритм отримує матрицю висот на вході і використовує структуру даних множина та черга з пріоритетом.

Множина, для даного алгоритму, це структура даних, в яку можна додати деякий елемент і можна перевірити чи цей елемент знаходяться в множині. В даному алгоритмі елементом буде комірка мапи висот (її координати та значення).

Черга з пріоритетом, для даного алгоритму, це структура даних яка має наступні можливості:

1. Додати елемент в чергу. Для даної структури елемент повинен мати якусь вагу. Для даного алгоритму елементом буде комірка мапи висот, а вагою елементу – розлив даної комірки

2. Вибрати елемент з черги. Структура даних буде повертати елемент з найменшою вагою.

Текстовий опис алгоритму буде виглядати таким чином:

1. Для всіх елементів на кордоні мапи висот будемо:
 - a. Розливом вершини будемо рахувати її висоту
 - b. Додаємо вершину в чергу з пріоритетом
2. Поки черга з пріоритетом не порожня будемо:
 - a. Виберемо поточну вершину з черги
 - b. Позначимо поточну вершину відвіданою
 - c. Для всіх сусідів поточної вершини будемо:
 - i. Якщо сусід є в черзі, або відвіданий, то переходимо до наступного сусіда
 - ii. За розлив сусідньої вершини візьмемо максимальне значення висоти сусіда і розливу поточної вершини. Додаємо цю сусідню вершину в чергу.

Розглянемо роботу алгоритму на прикладі:

15	15	14	15	12	6	12
14	13	10	12	15	17	15
15	15	9	11	8	15	15
16	17	8	16	15	7	5
19	18	19	18	17	15	14

(a)

15	15	14	15	12	6	12
14	▨	▨	▨	▨	▨	15
15	▨	▨	▨	▨	▨	15
16	▨	▨	▨	▨	▨	5
19	18	19	18	17	15	14

(b)

15	15	14	15	12	6	12
14	▨	▨	▨	▨	▨	15
15	▨	▨	▨	▨	▨	15
16	▨	▨	▨	▨	7	5
19	18	19	18	17	15	14

(c)

15	15	14	15	12	6	12
14	▨	▨	▨	▨	15	17
15	▨	▨	▨	▨	15	15
16	▨	▨	▨	▨	7	5
19	18	19	18	17	15	14

(d)

15	15	14	15	12	6	12
14	▨	▨	▨	▨	15	17
15	▨	▨	▨	8	15	15
16	▨	▨	▨	15	7	5
19	18	19	18	17	15	14

(e)

15	15	14	15	12	6	12
14	▨	▨	▨	12	15	17
15	▨	▨	▨	11	8	15
16	▨	▨	▨	16	15	7
19	18	19	18	17	15	14

(f)

15	15	14	15	12	6	12
14	▨	11	12	15	17	15
15	▨	11	11	8	15	15
16	▨	11	16	15	7	5
19	18	19	18	17	15	14

(g)

15	15	14	15	12	6	12
14	13	11	12	15	17	15
15	15	11	11	8	15	15
16	▨	11	16	15	7	5
19	18	19	18	17	15	14

(h)

15	15	14	15	12	6	12
14	13	11	12	15	17	15
15	15	11	11	8	15	15
16	17	11	16	15	7	5
19	18	19	18	17	15	14

(i)

0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	2	0	0	0	0
0	0	3	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0

(j)

↘	↘	↓	↓	→	○	←
→	→	↘	↘	↗	↑	↖
↗	→	→	→	↘	↘	↓
↗	→	↗	↗	→	→	○
↗	↗	↑	↖	↗	↑	↑

(k)

1	1	1	1	2	2	2
1	1	1	1	2	2	2
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1

(l)

Рисунок 48 Приклад роботи алгоритму

Нехай в нас задана вхідна мапа висот (a). Першим кроком в чергу з пріоритетом додаються всі вершини по межі матриці і поточною стане вершина зі значенням 5 (b). Наступним кроком в результуючу матрицю Зливу додаються всі сусіди поточної вершини, і вибереться наступна поточна вершина зі значенням 6 (c). Так буде продовжуватись до тих пір поки значення вершини буде меншим ніж злив поточної вершини (f->g), в такому разі значення вершин будуть замінені на злив поточної вершини.

В результаті роботи алгоритму отримаємо матрицю зливів (i). Різниця між отриманою матрицею зливів та вхідними даними висоти показана матрицею (j).

Матриця напрямків потоків(k) визначається на етапі обходу сусідів, оскільки ми можемо вважати, що всі потоки будуть йти від сусідніх вершин. Матриця басейнів(l) може бути побудована на основі матриці потоків.

Основним результатом роботи алгоритму є наповнена матриця зливів та матриця потоків.

Додаток 2. Алгоритм побудови річкових порядків

На вході даного алгоритму задається матриця зливів та матриця напрямків потоків побудовані на основі алгоритму Венга та Ліу. Зауважимо що матриця напрямків потоків може бути також побудована на основі інших алгоритмів (<https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/raster-analysis/flow-direction.htm>).

Даний алгоритм є рекурсивним і запускається для кожної комірки таблиці. Отже по замовчуванню порядок кожної комірки є 0.

Для кожної комірки беремо всіх її сусідів, напрямок потоку яких буде на дану комірку та знаходимо їхній максимальний порядок і кількість комірок з максимальним порядком. Таким чином порядком даної комірки будемо вважати максимальний порядок її сусідів, якщо комірок з максимальним порядком було тільки 1, або максимальним порядком + 1.

Тобто, якщо зустрічаються дві річки з порядком a , то результуючий порядок буде $a+1$. Якщо зустрічається річка з порядком a , і річки менших порядків, то результуючим порядком буде все рівно a .

Маючи результати роботи алгоритму Венга та Ліу можемо побудувати матрицю порядків за такими ж вхідними даними:

0	0	0	0	0	1	0
0	1	1	0	0	0	0
0	0	0	2	2	0	0
0	0	1	0	0	2	2
0	0	0	0	0	0	0

Рисунок 49 Порядок потоків

Таким чином, для нашого прикладу - якщо нема двох і більше схилів, які направлені, до комірки – її порядок буде залишатися 0. Коли з'єднуються потоки порядком 1 – отримуємо порядок 2.