

Геоморфометричний і кліматичний аналіз річкової басейнової системи на підставі загальнодоступних глобальних геоданих (приклад Бистриці Підбузької)

Іван С. Круглов , Олеся О. Буряник , Анатолій Д. Смалійчук 

Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. П. Дорошенка, 41, Львів 79000, Україна

Анотація

Річкову басейнову систему, яку застосовують для дослідження руслового стоку, ієрархічно відображають як поєднання суббасейнів. Геоморфометричні (альтитуда, ухил поверхні) та кліматичні (температура повітря, опади) властивості суббасейнів є важливими чинниками, які визначають стік. Для передбачення річкового стоку необхідно також брати до уваги майбутню зміну кліматичних показників. Ми вибрали річковий басейн Бистриці Підбузької площею 500 км², який охоплює низькогір'я Карпат та височину Передкарпаття, для того, щоб продемонструвати можливості геоморфометричного та кліматичного аналізу на підставі глобальних геоданих, які є у вільному доступі. Радарна цифрова модель висот FABDEM V1-2 із розділенням 30 м дала змогу за допомогою функцій цифрового гідрологічного аналізу коректно виділити систему з 21 суббасейну площею від 63 до 5038 га для ланок водотоків 4–6 порядків за Стралером. За допомогою функції зональної статистики визначили, що середні альтитуди суббасейнів лежать у межах 259–656 м, а їхні середні ухили поверхні змінюються від 0 до 13°. FABDEM V1-2 забезпечила доволі точно виділення басейнів та реалістичний розрахунок ухилу поверхні навіть на ділянках плоского рельєфу, щоправда для цього її модифікували «заглибленням» мережі водотоків.

Кліматичні геодани CHELSA V2.1 із розділенням ~1 км використали для визначення середньорічних і середньомісячних значень температури повітря та сум опадів суббасейнів для 1981–2010 рр., а також ймовірних середньорічних значень цих показників для 2071–2100 рр. за сценарієм зміни клімату SSP3-7.0. Для цього застосували функцію зональної статистики. На початку нашого століття середня річна температура суббасейнів становила +4–+8,5°C, а середня річна сума опадів – 726–1055 мм. Сценарій SSP3-7.0 передбачає підвищення середньорічної температури на 3,6°C в усіх суббасейнах за незначного зростання кількості опадів. Геодани CHELSA не дають змогу надійно характеризувати невеликі розчленовані басейни через недостатню геометричну роздільність. Все ж, геодани CHELSA зручно застосовувати для оперативного аналізу клімату та його зміни як для регіонів, так локальних територій площею понад 10 км².

Ключові слова

Басейнова система, Бистриця Підбузька, геоморфометрія, зміна клімату, кліматичні геодани CHELSA, цифрова модель висот FABDEM

Надійшла до редакції: 3 березня 2025 / Прийнята: 23 березня 2025 / Опублікована онлайн: 30 березня 2025

Geomorphometric and climate analysis of a river basin system using freely-available global geodatasets (the case of the Bystrytsia Pidbuzka)

Ivan S. Kruhlov, Olesia O. Buriannyk, Anatoliy D. Smaliychuk

Ivan Franko National University of Lviv, 41, P. Doroshenko St, Lviv, 79000, Ukraine

Abstract

A river basin system, which is used to study channel runoff, is hierarchically represented as a network of sub-basins. Geomorphometric (altitude, surface slope) and climatic (air temperature, precipitation) properties of the sub-basins are important factors determining runoff. To predict river runoff, future changes in climatic indicators must also be taken into account. We selected the Bystrytsia Pidbuzka river basin of 500 km² located at the junction of the low Carpathian Mountains and the Forecarpathian Upland to demonstrate possibilities of a geomorphometric and climatic analysis using freely available global geodata.

The radar digital elevation model FABDEM V1-2 has a resolution of 30 m. It afforded delineation, using functions of digital hydrological analysis, a system of 21 sub-basins ranging from 63 to 5038 ha and referring to the stream links of 4–6 Strahler orders. We applied zonal statistics function to calculate mean altitude and slope values of the subbasins, which are in the range of 259–656 m and 0–13°, respectively. FABDEM V1-2 afforded rather accurate delineation of the watersheds and realistic calculation of the slope even within flat terrain. However, it had to be modified by “burning in” of the stream network.

Climatic geodata CHELSA V2.1 with a resolution of ~1 km was used to determine the average annual and average monthly air temperature and precipitation values of the sub-basins for 1981–2010, as well as the probable average annual values of these indicators for 2071–2100 according to the SSP3-7.0 climate change scenario. Again, the zonal statistics function was applied for this purpose. At the beginning of this century, the average annual temperature of the sub-basins was +4 – +8.5°C, and the average annual precipitation was 726–1055 mm. The SSP3-7.0 scenario projects an increase in average annual temperature by 3.6°C in all sub-basins with a slight increase in precipitation. CHELSA geodata does not reliably characterize small dissected basins due to insufficient geometric resolution. Nevertheless, CHELSA geodata is convenient for quick actual and future climate analysis for both regions and local areas over 10 km².

Keywords

Basin system, the Bystrytsia Pidbuzka, geomorphometry, climate change, CHELSA climatic geodata, FABDEM digital elevation model

Received: 3 March 2025 / Accepted: 23 March 2025 / Published online: 30 March 2025

Corresponding author:

Ivan S. Kruhlov, Ivan Franko National University of Lviv, 41, P. Doroshenko St, Lviv, 79000, Ukraine
Email: ivan.kruhlov@lnu.edu.ua

© 2025 The Authors. Published by Taras Shevchenko National University of Kyiv. This is an open-access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Вступ

Одним із важливих проявів зміни клімату є модифікація колообігу води в екосфері, яка суттєво впливає на гідрологічний режим суходолу (Yang et al., 2021). Тому виникає гостра необхідність у прогнозуванні не лише майбутньої зміни клімату, але й пов'язаних змін у гідрологічному режимі річок. Для цього тепер використовують геопросторово-розподілені механістичні детерміністські гідрологічні моделі (симулятори), на зразок SWAT (Neitsch et al., 2011), які поєднують з виводами (англ.: outputs) кліматичних моделей (Clark et al., 2016). Однак параметризація та калібрування таких симуляторів вимагає спеціальних знань та навичок, а також детальних місцевих геоданих, зокрема щодо клімату та гідрологічного режиму – тобто є доволі затратними з огляду ресурсів і часу. Водночас тепер загальнодоступними є різноманітні високороздільні цифрові моделі висот (ЦМВ) (Hawker et al., 2022; Jarvis et al., 2008; Tadono et al., 2014; Yamazaki et al., 2019) та інтерпольовані кліматичні геодани (Brun et al., 2022; Fick & Hijmans, 2017), які охоплюють майже усю поверхню Землі. Через це практичного значення також набувають менш точні, але простіші, способи визначення теперішніх та майбутніх кліматичних і гідрологічних характеристик річкових басейнів на підставі таких загальнодоступних глобальних геоданих без застосування складних механістичних моделей.

Отже, мета цього дослідження полягає в окресленні методики простої геоморфометричної та кліматичної характеристики річкової басейнової системи на підставі загальнодоступних глобальних геоданих, яку можна використовувати для оцінки впливу зміни клімату на гідрологічний режим. Реалізували методику на прикладі басейну середньої річки Бистриці Підбузької, який є репрезентативним для північно-східного сточища Карпат.

2. Територія дослідження

Річка Бистриця Підбузька є правою притокою р. Дністер, що повністю розташована у межах Львівської області (рис. 1). Дослідженням охоплений басейн Бистриці Підбузької до злиття з р. Тисмениця. Його площа становить 500 км² при довжині головного русла – 79 км. Верхів'я Бистриці та її значної лівої притоки Черхави розташовані у Карпатах – у флішовому низькогір'ї Крайових і Дністерських Бескидів, а середня і нижня течії – на хвилястих межиріччях і широких річкових днищах Верхньодністерського Передкарпаття. Альтитуда (висота над рівнем моря) змінюється від 858 м (г. Виділок) на південно-західній межі басейну до 255 м у місці злиття з р. Тисменицею на північному сході. Карпатські межиріччя складені елювіально-колювіальним кам'янистим суглинком – реголітом піщано-глинистого та піщавикового флішу, а передкарпатські межиріччя – колювіальним (давньоалувіальним) суглинком. Днища долин виповнені алувіальними суглинком і лакустриновими відкладами



Рис. 1. Розташування території дослідження
Fig. 1. Location of the study area

(торфом, мулом), заплави і річища піщано-галькові, а у нижній течії – суглинкові (Kruhlov et al., 2024).

За міжнародною класифікацією Кьоппена-Гайгера макроклімат басейну належить до типу Dfb – холодний, без сухого сезону, з теплим літом (Peel et al., 2007). За даними метеостанції Дрогобич, яка розташована поблизу на альтитуді 277 м, середня температура повітря у січні становить -3,4°C, а у липні – +18,1°C, річна сума опадів – 744 мм (Шубер, 2018). У карпатській частині басейну на межиріччях переважають бурі лісові щепенуваті ґрунти, на передкарпатській – буроземно-підзолисті оглеєні. У днищах долин зосереджені алувіальні лучні та торфово-болотні ґрунти, а також торфовища (Позняк, 2019). Природною рослинністю карпатської частини басейну є ялицево-букові ліси, передкарпатської – грабово-дубові та ялицево-дубові ліси, а перезволожених ділянок – чорновільшники (Kruhlov et al., 2008). Тепер заболочені днища долин дренавані, природна лісова рослинність значною мірою замінена сільськогосподарськими угіддями, лісовими культурами та сільськими поселеннями. У нижній течії споруджена гідроелектростанція, а русло каналізоване й обмежене дамбами.

3. Концептуальні основи

Річкова басейнова система є однією з категорій трансморфогенних (потокових) геоекосистем – геопросторових екологічних моделей ландшафту. Цю модель застосовують для дослідження впливу погоди або клімату, а також ландшафтних структур і процесів у межах басейну, на властивості руслового стоку у злив цього басейну. Великий річковий басейн переважно представляють як ієрархічну структуру, яка є поєднанням суббасейнів, пов'язаних русловим стоком. Суббасейни, які переважно ландшафтно неоднорідні, додатково

описують як комбінацію різних класів гідротопів (одиниць гідрологічної реакції) – відносно однорідних ділянок ландшафту з однаковим типом гідрологічного функціонування. Гідротопи як морфогенні ландшафтні одиниці, виділяють на підставі подібності топографічного положення, поверхневих відкладів/грунту і наземного покриву (Круглов, 2020; Neitsch et al., 2011). Зауважимо, що у цьому дослідженні гідротопи не виділяли.

Метеорологічними показниками, які використовують у гідрологічних моделях, є: сонячна радіація, температура повітря, кількість опадів, швидкість вітру і відносна вологість повітря. Ці показники, переважно добові, у поєднанні з параметрами гідротопів, дають змогу розрахувати евапотранспірацію та, відповідно, стік. Найважливішими, з огляду на параметризацію гідрологічних моделей, є температура повітря і кількість опадів. Метеорологічні параметри розраховують для кожного із суббасейнів шляхом геопросторової інтерполяції вимірювань метеорологічних станцій, які можуть бути розташовані поза межами річкового басейну (Neitsch et al., 2011). У випадку перспективного моделювання гідрологічного режиму залучають метеорологічні показники, отримані за допомогою різноманітних глобальних та регіональних кліматичних моделей, або їхніх ансамблів, для кількох загальноприйнятих сценаріїв зміни клімату протягом XXI століття – Shared Socioeconomic Pathways (SSP – Спільні соціоекономічні траєкторії) (O'Neill et al., 2014).

4. Глобальні геодани

Для делімітації річкової басейнової системи та її геоморфометричного аналізу ми використали глобальну ЦМБ FABDEM V1-2, яка є у вільному доступі для некомерційних проєктів (<https://data.bris.ac.uk/data/dataset>). У основі цих геоданих лежить глобальна радарна ЦМБ Copernicus GLO 30 DEM із розділенням ~30 м на екваторі (<https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model>), з якої додатково усунули спотворення, викликані деревним покривом та будівлями. Через це середня абсолютна вертикальна похибка на забудованих площах була зменшена з 1,62 до 1,12 м, а на залісених – з 5,15 до 2,88 м (Hawker et al., 2022). Результати порівняння з іншими глобальними ЦМБ, які мають розділення 30 м, – Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 та SRTM, – засвідчують, що FABDEM є найточнішою, особливо на лісовкритих ділянках і з малими ухилами поверхні (Meadows et al., 2024).

Для кліматичного аналізу скористалися глобальними геоданими для суходолу CHELSA V2.1 із розділенням 30 кутових секунд (~1 км), які відображають велику кількість різноманітних кліматичних показників (<https://chelsa-climate.org/downloads>). Для періоду 1981–2010 рр. ці показники розраховані за фактичними даними глобальної мережі метеостанцій. Крім того, вони зпроєктовані на періоди 2011–2040, 2041–2070 і 2070–2100 рр. згідно з п'ятьма різними кліматичними моделями

і за трьома сценаріями зміни клімату: SSP1-2.6, SSP3-7.0 і SSP5-8.5. Для геопросторової інтерполяції значень температури повітря й атмосферних опадів розробники бази даних використали ЦМБ, а також дані про вітрові поля, експонованість долин і альтитуду пограничного шару, і це дало змогу реалістично врахувати орографічні ефекти (Brun et al., 2022; Karger et al., 2017). У порівнянні з іншими (суб-)глобальними кліматичними геоданими, наприклад WorldClim, CHELSA відзначається вищою точністю, особливо щодо розподілу опадів, оскільки для інтерпретації додатково використали сателітні дані про хмарність (Karger et al., 2021).

5. Методи

Для опрацювання геоданих застосували програмне забезпечення ArcGIS Pro (<https://pro.arcgis.com>) та QGIS (<https://qgis.org>), а також WhiteboxTools (<https://www.whiteboxgeo.com>) для делімітації басейнової системи. Оригінальні глобальні геодани ЦМБ FABDEM V1-2 та кліматичних показників CHELSA, які є у географічних координатах WGS84, “вирізуали” для території дослідження та зпроєктували у систему координат UTM із розділенням відповідно 30 м і 500 м з передискретизацією методом кубічної конволюції. Для аналізу кліматичних особливостей басейнової системи використали геодани CHELSA про середні щорічні та щомісячні значення температури повітря і сум опадів для історичного кліматичного періоду 1981–2010 рр., а також ці самі середні щорічні показники, зпроєктовані на 2071–2100 рр. за допомогою моделі GFDL-ESM 4 (Dunne et al., 2020) для сценарію SSP3-7.0. Цей “помірно песимістичний” сценарій під назвою “Регіональне суперництво” передбачає міждержавні конфлікти, які унеможливають ефективне міжнародне співробітництво щодо вирішення екологічних проблем, та, як наслідок, зростання глобального радіаційного балансу на 7.0 Вт*м⁻² до 2100 року (Shiogama et al., 2023). Також завантажили офіційні векторні дані річкової мережі України (<http://geoportal.davr.gov.ua>), «вирізуали» для території дослідження, зпроєктували в UTM координати, виправили помилки та растеризували з таким же розділенням, як ЦМБ – 30 м.

За допомогою локальної функції алгебри карт річкову мережу “заглибили” у ЦМБ на 2 м і створили гідрологічно-коректну версію ЦМБ – таку, що не містить грубих помилок у напрямках акумуляції стоку. Тоді за допомогою отриманих геоданих акумуляції стоку генерували мережу дрібних водотоків. Для цього експериментально визначили, що водотік загалом починається з водозбірної площі у 10 га – 111 комірок растру. Отримані у такий спосіб водотоки ранжували за Стралером, а після цього делімітували суббасейни для ланок 4-го і вищих порядків. На завершення растрові геодани суббасейнів перетворили у векторний формат та генералізували – елімінували дрібні ареали (менше 10 га), які головню були артефактами моделювання. Суббасейнам присвоїли унікальні власні назви (за

назвами сіл, розташованих у їхніх межах) та індекси, які одночасно відображають їхню топологію (пов'язаність русловим стоком) та порядок за Стралером.

За допомогою функції зональної статистики для суббасейнів розраховували середні значення та стандартні відхилення альтитуди й ухилу поверхні на підставі даних FABDEM. Так само, на підставі кліматичних показників CHELSA для суббасейнів визначили середні значення та стандартні відхилення середньорічних і середньомісячних показників температури повітря і сум опадів. Зауважимо, що величина стандартного відхилення у даному випадку є важливим індикатором геопросторової неоднорідності. Геоморфометричні та середньорічні кліматичні показники візуалізували у вигляді карт, а середньомісячні кліматичні показники представили як графіки річного розподілу за суббасейнами.

6. Результати та їх обговорення

Згідно з отриманими нами даними, площа басейну Бистриці Підбузької загалом становить 50 005 га, його середня альтитуда сягає 416 м при стандартному відхиленні у 139 м, а середній ухил поверхні – 5,5° при стандартному відхиленні у 5,8°. У межах басейну виділили 21 суббасейн 4-6 порядків за Стралером. Найменшу площу – 63 га – має суббасейн 6-го порядку найнижчої ланки водотоку при злитті з Тисменицею, який обмежений дамбами – SB100, а найбільшу – 5038 га – суббасейн 4-го порядку верхів'я Черхави – SB431

(рис. 2, 3). SB100 має найменші середні альтитуду (259 м) та ухил поверхні (0°), а також мінімальні стандартні відхилення цих показників, оскільки розташований на пласкій алювіально-лакустриновій Верхньодністерській рівнині. На відміну, найвище розташований суббасейн Смільної у Дністерських Бескидах (SB622) – його середня альтитуда сягає 656 м, а суббасейн Сторони (SB601) відзначається найбільшим стандартним відхиленням альтитуди (101 м) та ухилу поверхні (11°) – це зумовлено його гірським розташуванням на межі Верхньодністерських та Крайових Бескидів і значною площею (4523 га). Найбільший середній ухил поверхні – 13° – має гірський суббасейн ланки 5-го порядку Залокотя (SB620), який більшою частиною охоплює круті схили, сформовані фронтальною частиною сколівської тектонічної скиби на північно-східній межі Дністерських Бескидів.

Геоморфометричні показники засвідчують значне різноманіття рельєфу басейнової системи Бистриці Підбузької, що робить її репрезентативною модельною територією для дослідження ландшафтно-кліматичних і ландшафтно-гідрологічних особливостей північно-східного мегасхилу Карпат та передкарпатських рівнин.

З огляду на середньорічну температуру повітря протягом 1981-2010 рр., цілком очікувано найтеплішим був найнижчий суббасейн (SB100) з показником +8,5°C, а найхолоднішими – найвище розташовані суббасейни (SB622 і SB621) зі значенням +6,4°C (рис. 4). Якщо середні значення температури повітря чітко корелюються з показниками середньої альтитуди, то стандартні відхилення температури

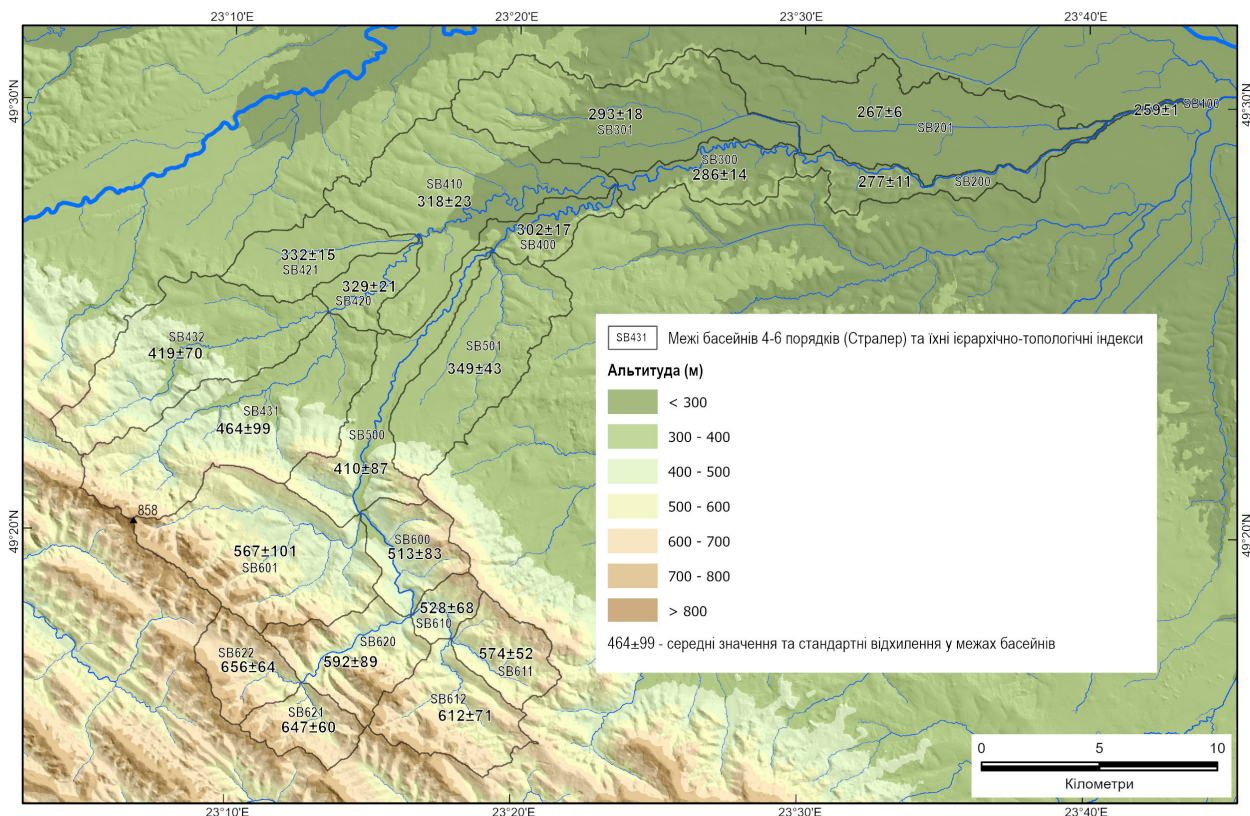


Рис. 2. Альтитуди басейнової системи річки Бистриця Підбузька
Fig. 2. Altitudes of the Bystrytsia Pidbuzka River Basin System

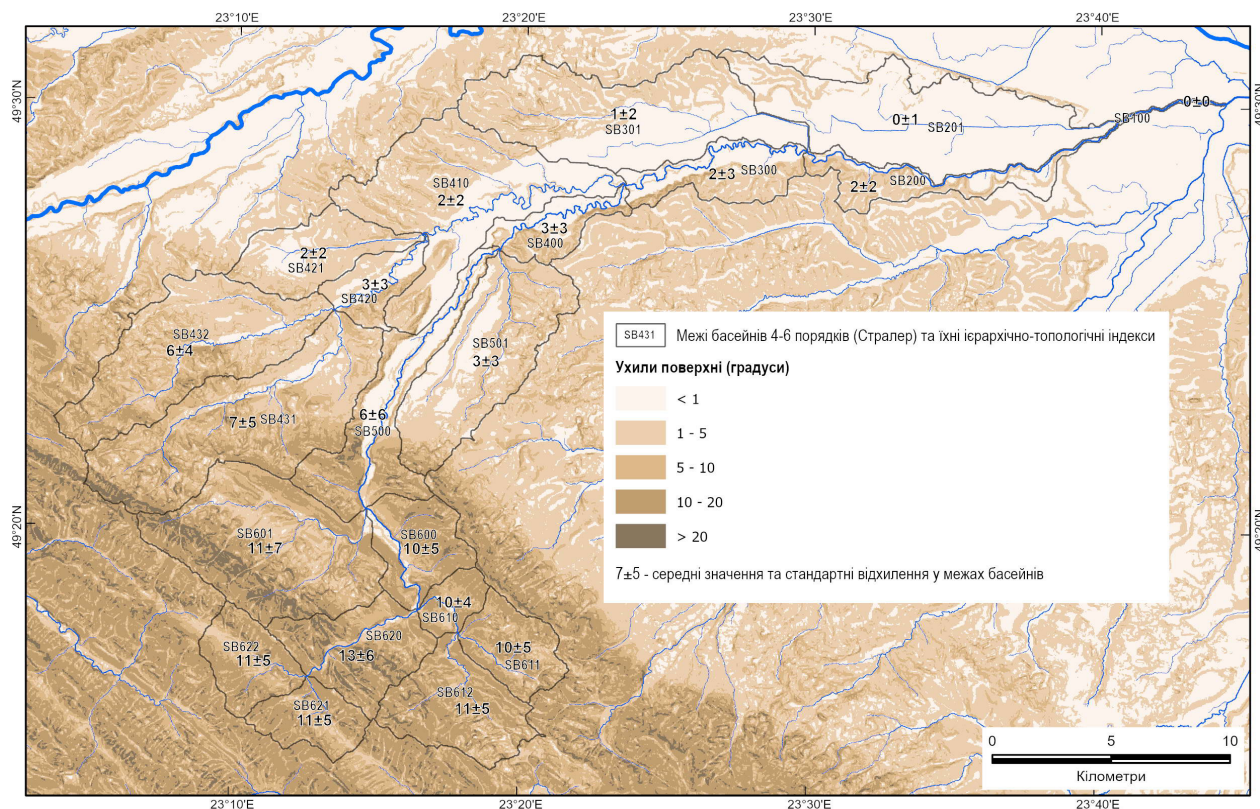


Рис. 3. Ухили поверхні басейнової системи річки Бистриця Підбузька
Fig. 3. Surface slopes of the Bystrytsia Pidbuzka river basin system

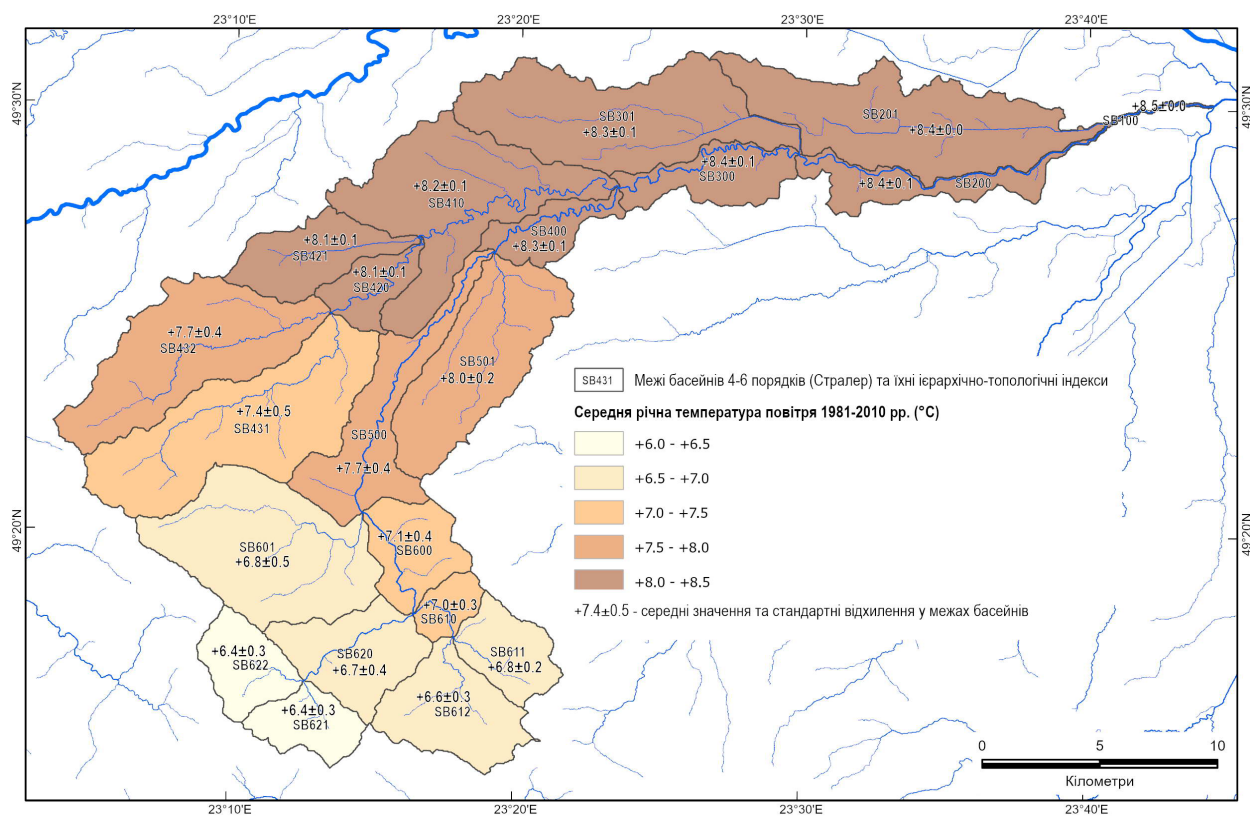


Рис. 4. Середня річна температура повітря 1981–2010 рр. басейнової системи річки Бистриця Підбузька
Fig. 4. Average annual air temperature 1981–2010 of the Bystrytsia Pidbuzka river basin system

повітря відображають таку саму кореляцію зі стандартними відхиленнями альтитуди (див. рис. 2).

Найнеодноріднішими, з огляду на теплозабезпечення, є гірські суббасейни SB431 і SB601 зі стандартним відхиленням середньорічної температури повітря $0,5^{\circ}\text{C}$. На відміну, суббасейни нижньої течії з плоским рельєфом (SB100 і SB201) характеризуються мінімальним стандартним відхиленням цього показника, який менший точності розрахунку і тому має значення $0,0^{\circ}\text{C}$.

Річний хід історичної (1981–2010 рр.) середньої багаторічної середньомісячної температури повітря має загалом однакову траєкторію для всіх суббасейнів, але відрізняється значеннями показників та амплітудою

(рис. 5). Середньомісячні показники температури, як і середньорічні, добре корелюються з середньою альтитудою суббасейнів (див. рис. 2) – чим більша середня альтитуда, тим менші середньомісячні показники температури повітря та їхні річні амплітуди. Так, найнижчий і найтепліший суббасейн SB100 характеризувався амплітудою у $21,5^{\circ}\text{C}$ (від $-2,5^{\circ}\text{C}$ у січні до $+19,0^{\circ}\text{C}$ у липні), а найвищий і найхолодніший суббасейн SB622 – у $20,3^{\circ}\text{C}$ (від $-4,0^{\circ}\text{C}$ у січні до $+16,3^{\circ}\text{C}$ у липні). Водночас різниця температури між суббасейнами була найбільшою у найтепліший місяць (липень) і становила $2,7^{\circ}\text{C}$, а найменшою у грудні – $1,2^{\circ}\text{C}$.

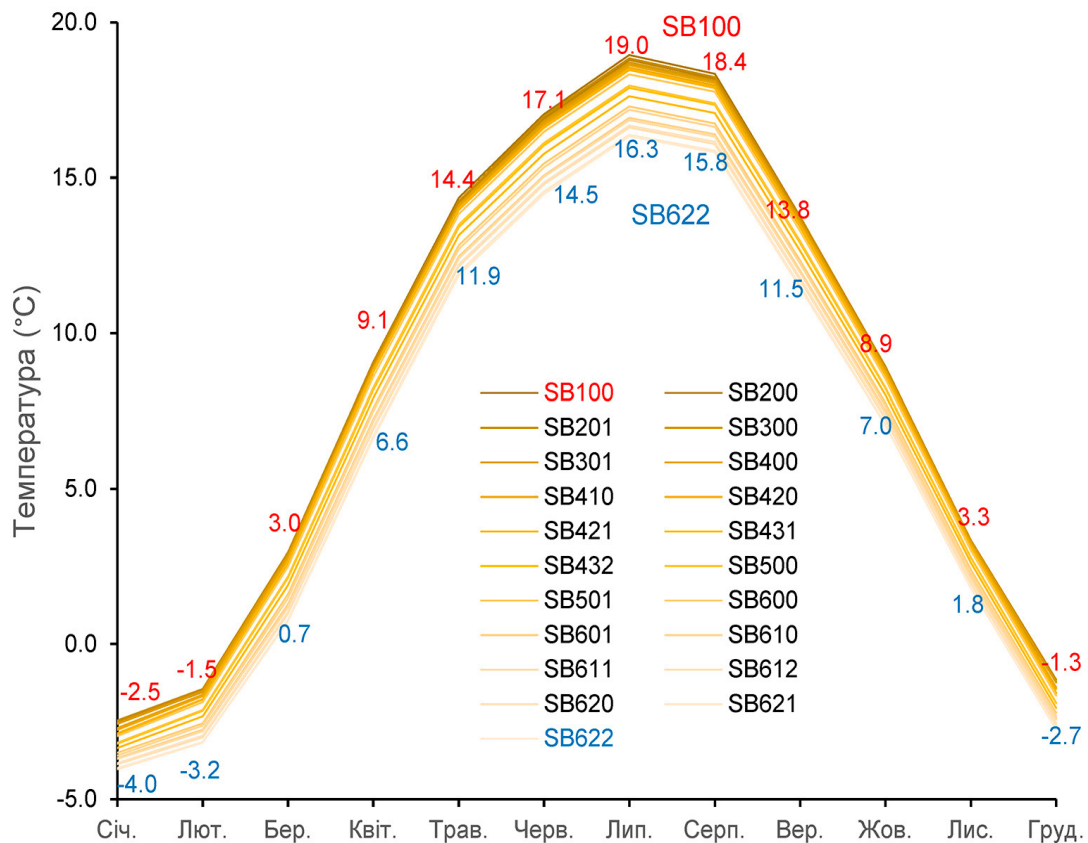


Рис. 5. Річний хід середньої середньомісячної температури повітря 1981–2010 рр. басейнової системи річки Бистриця Підбузька
Fig. 5. Annual trend of the average monthly air temperature 1981–2010 of the Bystrytsia Pidbuzka river basin system

Розподіл річних сум атмосферних опадів за суббасейнами протягом 1981–2010 рр., так само як і температура повітря, добре корелюється з альтитудою – як за середніми значеннями, так і за стандартним відхиленням. Найменшу річну кількість опадів отримував найнижчий суббасейн SB100 – 726 мм, а найбільшу – найвищий суббасейн SB622 – 1055 мм (рис. 6). Найбільшим стандартним відхиленням річної суми опадів характеризується суббасейн SB431 – 85 мм. Він відзначається значним перепадом альтитуди, зумовленим пограничним гірсько-рівнинним положенням. Невеликі стандартні відхилення демонструють не лише рівнинні суббасейни (напр., SB100 – 2 мм), але й гірські суббасейни невеликої площі з доволі суттєвим вертикальним розчленуванням – напр., SB610 і SB611 – 6 мм. Очевидно, в останньому

випадку Показник нерівномірності розподілу опадів значно занижений через відносно низьке геометричне розділення геоданих CHELSA (~ 1 км) – у такому випадку на суббасейни площею менше 10 km^2 припадає надто мала кількість комірок кліматичного растру для реалістичного розрахунку стандартного відхилення.

Річний розподіл середніх місячних сум опадів за історичний період (1981–2010 рр.) є подібним для усіх суббасейнів, але відрізняється конкретними значеннями та річною амплітудою, які корелюються з альтитудою (рис. 7). Мінімальна кількість опадів (34–52 мм) спостерігалася у січні, а максимальна (99–143 мм) – у липні та серпні. Різниця між максимальними та мінімальними місячними сумами опадів була найменшою для “найсухішого” суббасейну SB100 – 65 мм, а найбільшою – для “найвологішого” суббасейну

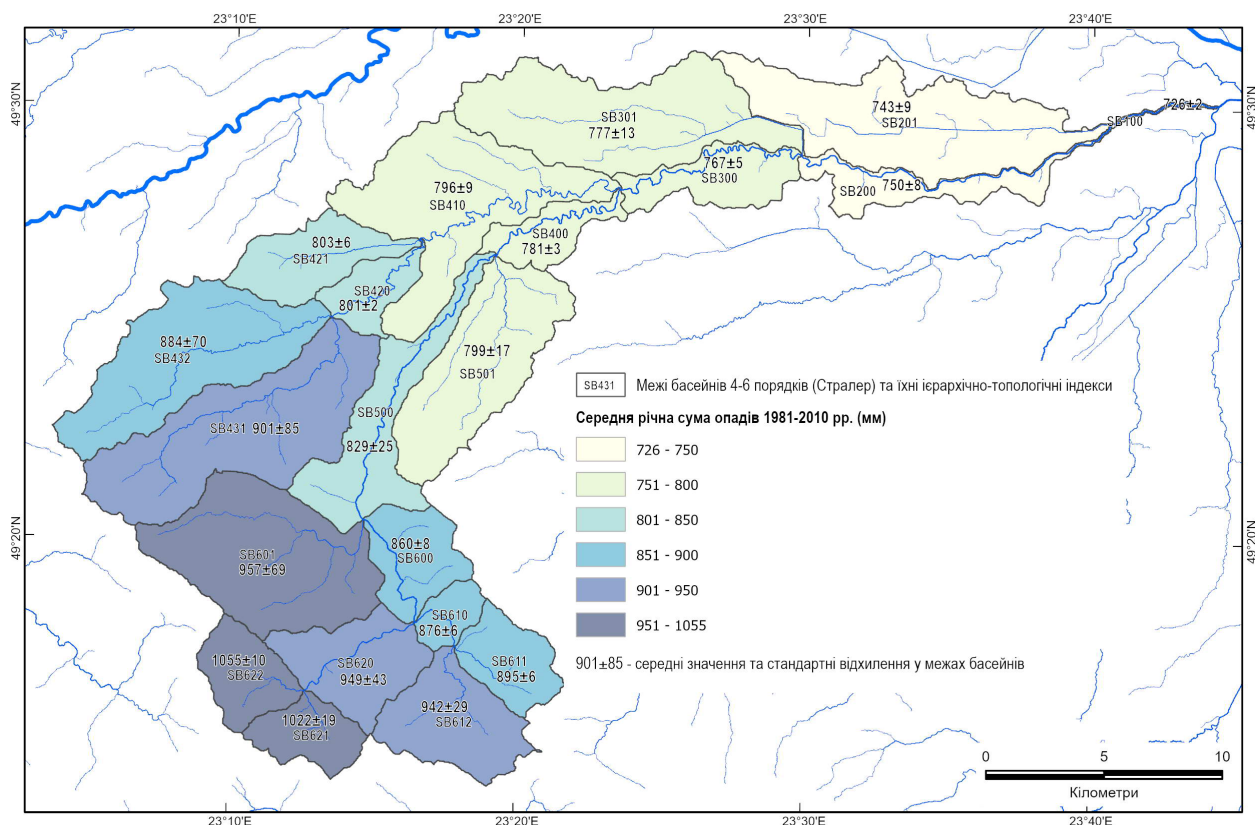


Рис. 6. Середня річна сума атмосферних опадів 1981–2010 рр. басейнової системи річки Бистриця Підбузька
Fig. 6. Average annual precipitation 1981–2010 of the Bystrytsia Pidbuzka river basin system

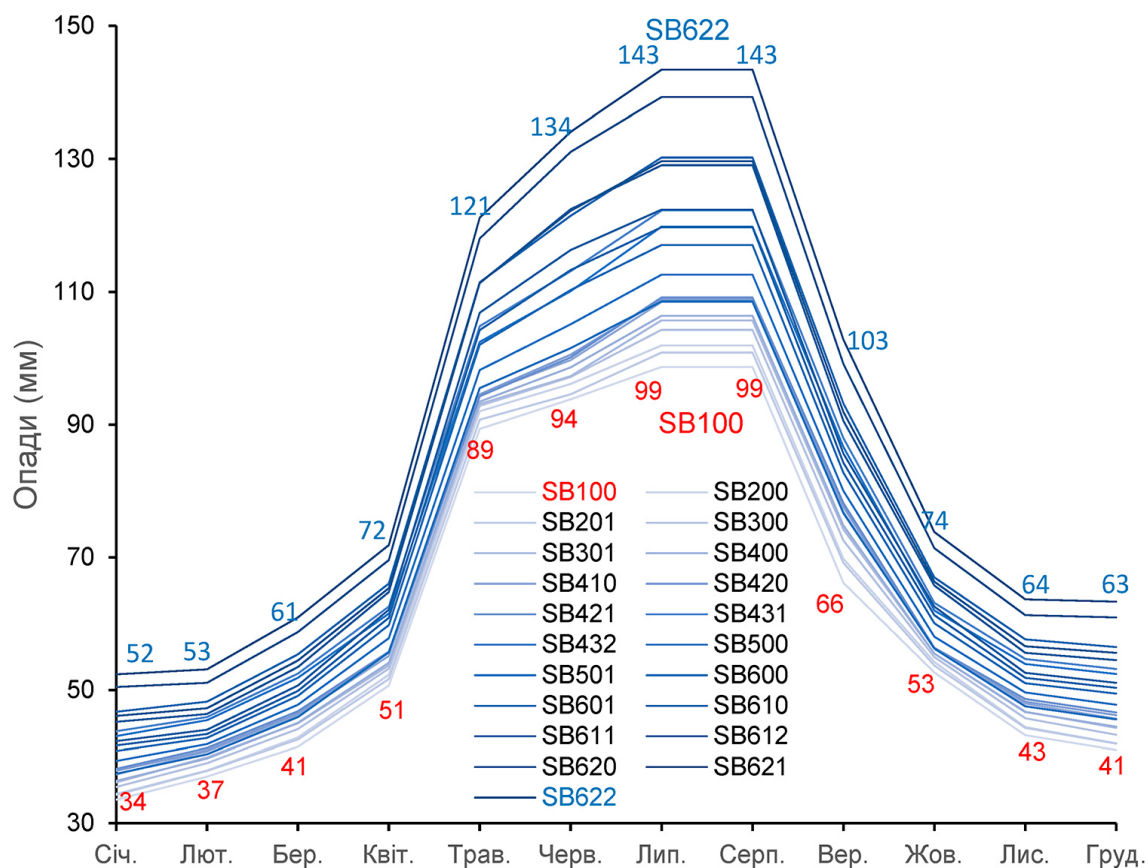


Рис. 7. Річний розподіл середніх місячних сум опадів 1981–2010 рр. басейнової системи річки Бистриця Підбузька
Fig. 7. Annual distribution of average monthly precipitation amounts 1981–2010 of the Bystrytsia Pidbuzka river basin system

SB622 – 91 мм. Найменша різниця у сумах опадів між суббасейнами була у грудні – 16 мм, а найбільша – у липні та серпні – 45 мм.

Проекція середньорічної температури повітря на 2071–2100 рр. за сценарієм SSP3-7.0 відображає її однакове зростання в усіх суббасейнах на $3,6^{\circ}\text{C}$ (рис. 8). Водночас очікується невелике збільшення й річної суми опадів – від 19 мм у суббасейні SB421 до 24 мм у суббасейнах SB100 і SB620 (рис. 9). Відсутність чіткої кореляції проєктованого майбутнього зростання кількості опадів з альтитудою, яка виступає провідним фактором геопросторової диференціації всіх інших кліматичних показників, можна пояснити

трьома обставинами: 1) артефактами деталізації (downscaling) виводу кліматичної моделі, яка має розділення ~ 100 км (Dunne et al., 2020); 2) невеликими значеннями зростання суми опадів та 3) мінімальними геопросторовими відмінностями (до 5 мм у межах басейнової системи), які цілком можуть знаходитися у межах похибки моделювання. Також наголосимо, що стрімке зростання температури повітря за незначного збільшення кількості опадів за сценарієм SSP3-7.0 однозначно призведе до драматичного зменшення стоку, особливо у рівнинних суббасейнах з невеликою часткою лісового покриву, та до докорінної зміни інших екологічних умов.

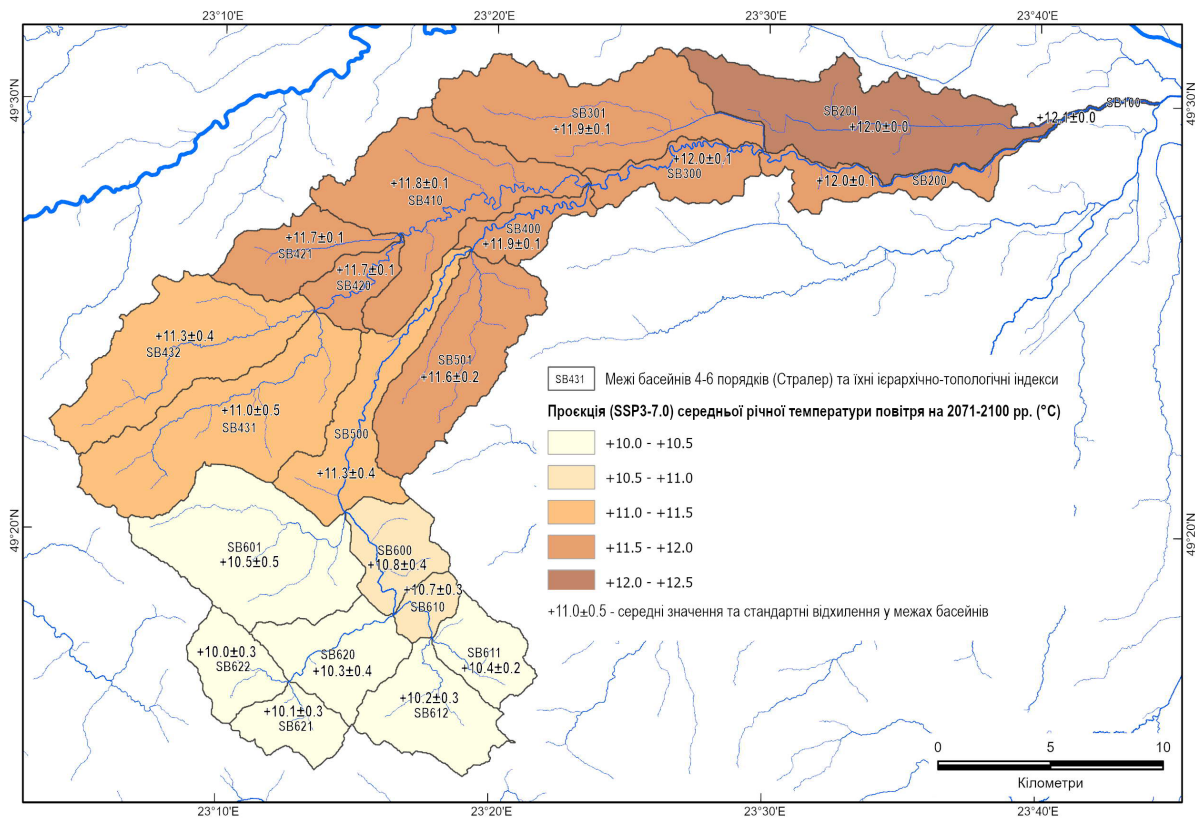


Рис. 8. Проекція середньої річної температури повітря на 2071–2100 рр. згідно зі сценарієм SSP3-7.0 для басейнової системи річки Бистриця Підбузька

Fig. 8. Projection of the average annual air temperature for 2071–2100 according to the SSP3-7.0 scenario for the Bystrytsia Pidbuzka river basin system

7. Висновки

Проведене дослідження показало, що глобальна радарна ЦМВ FABDEM V1-2 із розділенням ~ 30 м є зручним джерелом геоданих для автоматизованої делімітації та геоморфометричного аналізу басейнових систем не лише регіонального, але й локального рівня. Ця ЦМВ забезпечує доволі точне виділення меж басейнів навіть на ділянках плаского рельєфу через мінімізацію спотворень, викликаних деревним покривом та забудовою. Щоправда, для підвищення точності визначення напрямку стоку на пласких ділянках бажано модифікувати ЦМВ за допомогою «заглиблення» у неї мережі водотоків. Відносно високе розділення FABDEM також забезпечує реалістичний розрахунок ухилу поверхні. Так, за допомогою ЦМВ

FABDEM V1-2 була делімітована гірсько-рівнинна річкова басейнова система Бистриці Підбузької як поєднання 21 суббасейну площею від 63 до 5038 га, а також розраховані основні геоморфометричні показники суббасейнів – середні альтитуди (259–656 м) та середні ухили поверхні (0 – 13°), а також їхні стандартні відхилення.

Глобальні геодані CHELSA V2.1 із розділенням ~ 1 км є цінним джерелом інформації для оперативного аналізу теперішнього регіонального та локального клімату та його проєктованої, за допомогою різних моделей і сценаріїв, зміни протягом XXI століття. Кліматичні геодані CHELSA дали змогу охарактеризувати суббасейни Бистриці Підбузької щодо середньорічних і середньомісячних значень температури повітря та сум опадів станом на початок століття, а також щодо

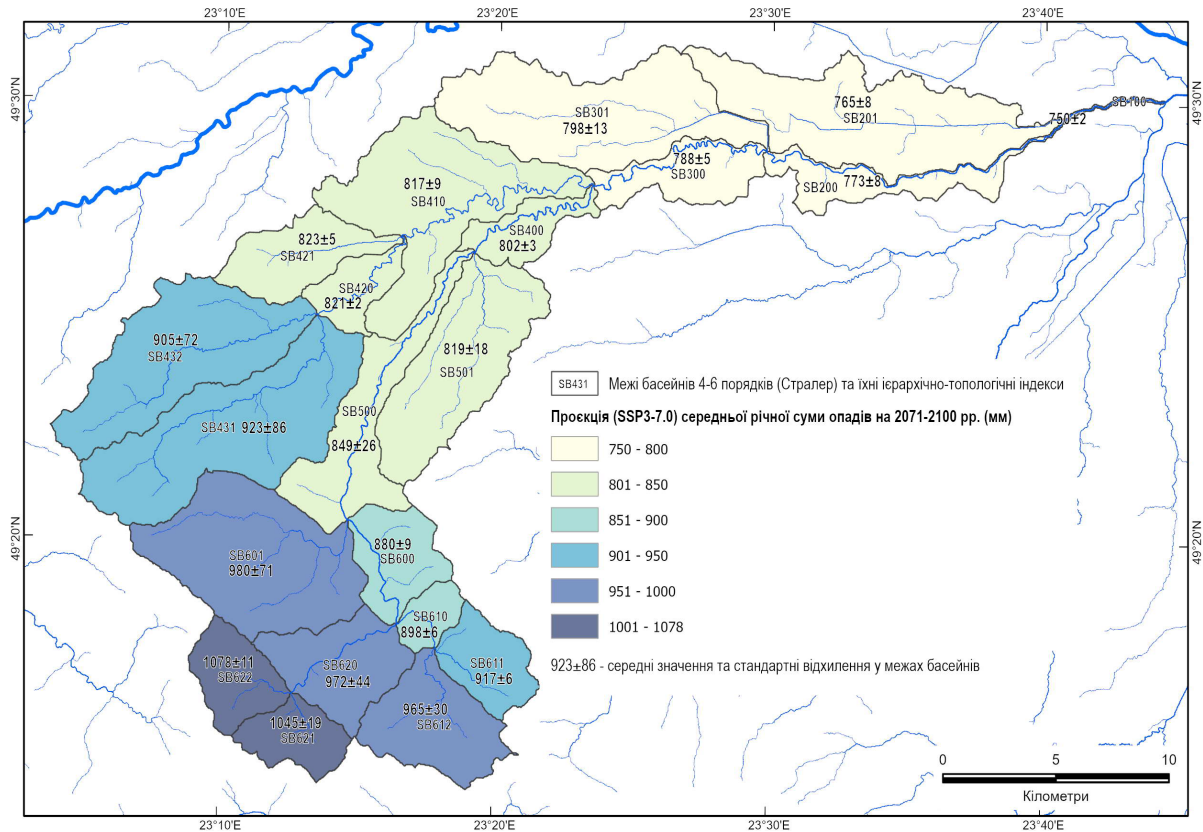


Рис. 9. Проекція середньої річної суми атмосферних опадів на 2071–2100 рр. згідно зі сценарієм SSP3-7.0 для басейнової системи річки Бистриця Підбузька

Fig. 9. Projection of the average annual precipitation for 2071–2100 according to the SSP3-7.0 scenario for the Bystrytsia Pidbuzka river basin system

проектованих середньорічних значень цих показників на кінець століття згідно зі сценарієм зміни клімату SSP3-7.0. На початку нашого століття середня річна температура суббасейнів становила $+4\text{--}+8,5^{\circ}\text{C}$, а середня річна сума опадів – 726–1055 мм. Сценарій SSP3-7.0 передбачає підвищення середньорічної температури на $3,6^{\circ}\text{C}$ в усіх суббасейнах за незначного зростання кількості опадів. У випадку такої зміни докорінно зміниться гідрологічний режим, а також ландшафтні структури і процеси в усіх суббасейнах.

Геодані CHELSA мають певні обмеження. Зокрема вони не дають змогу надійно характеризувати невеликі розчленовані басейни (площею до 10 км²) через недостатню геометричну роздільність. Ймовірно, це обмеження можна частково подолати через подальшу їхню деталізацію (downscaling) на підставі ЦМВ вищого розділення з використанням геостатистичних функцій. Крім того, геодані CHELSA, які мають середньорічне та середньомісячне часове розділення, не годяться для параметризації складних гідрологічних моделей, які потребують щодобових погодних даних. Однак вони залишаються зручним джерелом інформації для оперативного аналізу клімату та його зміни для регіонів і локальних територій.

8. Подяки

Це дослідження виконане у рамках науково-дослідної теми 0121U113567 Міністерства освіти і науки України.

ORCID iD

Ivan S. Kruhlov <https://orcid.org/0000-0002-0814-0935>

Olesia O. Buriayk <https://orcid.org/0000-0003-1596-0461>

Anatoliy D. Smaliychuk <https://orcid.org/0000-0001-6294-6035>

Список посилань

- Brun, P., Zimmermann, N. E., Hari, C., Pelliser, L., & Karger, D. N. (2022). *CHELSA-BIOCLIM+ A novel set of global climate-related predictors at kilometre-resolution*. *EnviDat*. <https://www.doi.org/10.16904/envidat.332>
- Clark, M. P., Wilby, R. L., Gutmann, E. D., Vano, J. A., Gangopadhyay, S., Wood, A. W., Fowler, H. J., Prudhomme, C., Arnold, J. R., & Brekke, L. D. (2016). Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change. *Current Climate Change Reports*, 2(2), 55–64. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0034-x>
- Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Adcroft, A. J., Ginoux, P., Held, I. M., John, J. G., Krasting, J. P., Malyshev, S., Naik, V., Paulot, F., Shevliakova, E., Stock, C. A., Zadeh, N., Balaji, V., Blanton, C., Dunne, K. A., Dupuis, C., Durachta, J., Dussin, R., ... Zhao, M. (2020). The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall Coupled Model Description and Simulation Characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11), e2019MS002015. <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). *Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database*: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Karger, D. N., Wilson, A. M., Mahony, C., Zimmermann, N. E., & Jetz, W. (2021). Global daily 1 km land surface precipitation based on cloud cover-informed downscaling. *Scientific Data*, 8(1), 307. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01084-6>
- Круглов, І. (2020). *Трансдисциплінарна геоекологія: Монографія*. Львів: ЛНУ ім. І. Франка.
- Kruhlov, I., Mukha, B., & Senchyna, B. (2008). Natural geoecosystems of the Upper Dnister Basin. In M. Roth, R. Nobis, V. Stetsiuk, & I. Kruhlov (Eds.), *Transformation processes in the Western Ukraine: Concepts for a sustainable land use* (pp. 81–97). Weißensee-Verlag.
- Kruhlov, I., Smaliychuk, A., & Svatko, Y. (2024). Hybrid delineation of landforms: Case of Bystrytsia-Pidbuzka drainage basin. *Problemy Geomorfologii i Paleogeografii Ukrainykh Karpat i Prylehlykh Terytoriy*, 17(2), 148-159. <https://doi.org/10.30970/gpc.2024.2.4563>
- Meadows, M., Jones, S., & Reinke, K. (2024). Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), 2308734. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation. Version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- O'Neill, B. C., Krieger, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Позняк, С. П. (ред.). (2019). *Ґрунти Львівської області: Колективна монографія*. Львів: ЛНУ ім. І. Франка.
- Shiogama, H., Fujimori, S., Hasegawa, T., Hayashi, M., Hirabayashi, Y., Ogura, T., Iizumi, T., Takahashi, K., & Takemura, T. (2023). Important distinctiveness of SSP3–7.0 for use in impact assessments. *Nature Climate Change*, 13(12), 1276–1278. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01883-2>
- Шубер, П. (2018). Клімат. У Львівська область: Природні умови та ресурси (с. 157–188). Львів: Видавництво Старого Лева.
- Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., & Iwamoto, H. (2014). Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II–4, 71–76. ISPRS Technical Commission IV Symposium (Volume II-4) - 14–16 May 2014, Suzhou, China. <https://doi.org/10.5194/isprannals-II-4-71-2014>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P. D., Allen, G. H., & Pavelsky, T. M. (2019). MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. *Water Resources Research*, 55(6), 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>
- Yang, D., Yang, Y., & Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>

References

- Brun, P., Zimmermann, N. E., Hari, C., Pelliser, L., & Karger, D. N. (2022). *CHELSEA-BIOCLIM+ A novel set of global climate-related predictors at kilometre-resolution*. *EnviDat*. <https://www.doi.org/10.16904/enviDat.332>
- Clark, M. P., Wilby, R. L., Gutmann, E. D., Vano, J. A., Gangopadhyay, S., Wood, A. W., Fowler, H. J., Prudhomme, C., Arnold, J. R., & Brekke, L. D. (2016). Characterizing uncertainty of the hydrologic impacts of climate change. *Current Climate Change Reports*, 2(2), 55–64. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0034-x>
- Dunne, J. P., Horowitz, L. W., Adcroft, A. J., Ginoux, P., Held, I. M., John, J. G., Krasting, J. P., Malyshev, S., Naik, V., Paulot, F., Shevliakova, E., Stock, C. A., Zadeh, N., Balaji, V., Blanton, C., Dunne, K. A., Dupuis, C., Durachta, J., Dussin, R., ... Zhao, M. (2020). The GFDL Earth System Model Version 4.1 (GFDL-ESM 4.1): Overall Coupled Model Description and Simulation Characteristics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(11), e2019MS002015. <https://doi.org/10.1029/2019MS002015>
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Hawker, L., Uhe, P., Paulo, L., Sosa, J., Savage, J., Sampson, C., & Neal, J. (2022). A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 17(2), 024016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). *Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database*: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Karger, D. N., Conrad, O., Böhrner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N. E., Linder, H. P., & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Karger, D. N., Wilson, A. M., Mahony, C., Zimmermann, N. E., & Jetz, W. (2021). Global daily 1 km land surface precipitation based on cloud cover-informed downscaling. *Scientific Data*, 8(1), 307. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01084-6>
- Kruhlov, I. (2020). *Transdystyplinarna geoekologiya: Monografiya* [Transdisciplinary Geoecology: Monograph]. Lviv: LNU im. I. Franka. [In Ukrainian].
- Kruhlov, I., Mukha, B., & Senchyna, B. (2008). Natural geoecosystems of the Upper Dnister Basin. In M. Roth, R. Nobis, V. Stetsiuk, & I. Kruhlov (Eds.), *Transformation processes in the Western Ukraine: Concepts for a sustainable land use* (pp. 81–97). Weißensee-Verlag.
- Kruhlov, I., Smaliychuk, A., & Svatko, Y. (2024). Hybrid delineation of landforms: Case of Bystrytsia-Pidbuzka drainage basin. *Problemy Geomorfologii i Paleogeografii Ukrainykh Karpat i Prylehlykh Terytoriy*, 17(2), 148-159. <https://doi.org/10.30970/gpc.2024.2.4563>
- Meadows, M., Jones, S., & Reinke, K. (2024). Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-

- prone environments. *International Journal of Digital Earth*, 17(1), 2308734. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation. Version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-0130905-2>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Poznyak, S. P. (red.). (2019). *Grunty L'vivskoyi oblasti: Kolektyvna monohrafiya* [Lands of the Lviv region: Collective monograph] Lviv: LNU im. I. Franka. [In Ukrainian].
- Shiogama, H., Fujimori, S., Hasegawa, T., Hayashi, M., Hirabayashi, Y., Ogura, T., Iizumi, T., Takahashi, K., & Takemura, T. (2023). Important distinctiveness of SSP3–7.0 for use in impact assessments. *Nature Climate Change*, 13(12), 1276–1278. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01883-2>
- Shuber, P. (2018). *Klimat* [Klimat]. U L'vivs'ka oblast': Pryrodni umovy ta resursy (ss. 157–188). Lviv: Vydavnytstvo Staroho Leva. [In Ukrainian].
- Tadono, T., Ishida, H., Oda, F., Naito, S., Minakawa, K., & Iwamoto, H. (2014). Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II–4, 71–76. ISPRS Technical Commission IV Symposium (Volume II-4) - 14–16 May 2014, Suzhou, China. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-4-71-2014>
- Yamazaki, D., Ikeshima, D., Sosa, J., Bates, P. D., Allen, G. H., & Pavelsky, T. M. (2019). MERIT Hydro: A High-Resolution Global Hydrography Map Based on Latest Topography Dataset. *Water Resources Research*, 55(6), 5053–5073. <https://doi.org/10.1029/2019WR024873>
- Yang, D., Yang, Y., & Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>