

УДК 911.52; DOI 10.30970/gpc.2021.2.3551

АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ПОВЕРХНІ БАСЕЙНУ Р. БИСТРИЦЯ ТА ВПЛИВУ НА НЬОГО МОРФОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬЄФУ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОЗОБРАЖЕНЬ LANDSAT

Олександр Мкртчян¹, Іван Ковальчук²

¹Львівський національний університет імені Івана Франка,
alemkrt@gmail.com; orcid.org/0000-0002-3496-0435;

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ,
kovalchukip@ukr.net; orcid.org/0000-0002-2164-1259

Анотація. Морфологія рельєфу є потужним чинником впливу на кліматичні характеристики. Він проявляється на різних масштабних рівнях. На детальному масштабному рівні цей вплив насамперед зумовлений перерозподілом сонячної радіації на поверхнях і схилах різної крутості та експозиції, що проявляється у їхньому неоднаковому нагріванні, та локальним перерозподілом повітряних мас. Перспективним методом дослідження просторового розподілу температур земної поверхні є використання даних дистанційного зондування Землі в далекому інфрачервоному діапазоні спектру, які можна безпосередньо перевести у значення температури.

Використовуючи дані геозображень серії Landsat у далекому інфрачервоному діапазоні, обраховано значення температури підстильної поверхні території басейну р. Бистриці для трьох часових зрізів (5 жовтня 2013 р, 13 лютого 2015 р, 10 серпня 2016 р.) та здійснено статистичний аналіз впливу на цю температуру низки морфометричних параметрів та характеристик земної поверхні. Для визначення відносного впливу кожного конкретного чинника застосовано метод ієрархічного розбиття, реалізований у пакеті hier.part програмного середовища R. Виявлено значну сезонну диференціацію впливу окремих чинників на температуру. В усі сезони року найважливішим чинником серед проаналізованих визначено абсолютну висоту. При цьому вплив абсолютної висоти на розподіл температури був найбільшим восени, дещо меншим взимку і найменшим влітку. Штучні поверхні, суха трава та ґрунт, незважаючи на менше альbedo, нагрівались сильніше завдяки відсутності витрат тепла на випаровування, тоді як поверхня рослинного покриву та вологих ґрунтів нагрівалась слабше. З іншого боку, вплив диференційованої за елементами рельєфу відносної інсоляції поверхні виявився порівняно слабшим, що можна пояснити особливостями методики (інсоляція обраховувалась на момент отримання даних, тоді як прогрівання поверхні триває деякий час).

Ключові слова: температура земної поверхні; Landsat; Бистриця; морфометричні характеристики рельєфу; ієрархічне розбиття.

ANALYSIS OF TEMPERATURE REGIME OF LAND SURFACE FOR BYSTRYTSIA RIVER BASIN AND THE INFLUENCE OF TERRAIN ATTRIBUTES USING LANDSAT 8 DATA

Alexander Mkrtchian¹, Ivan Kovalchuk²

¹Ivan Franko National University of Lviv

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. Terrain morphology is a powerful factor influencing climate characteristics, which manifests itself at various scale levels. At the detailed scale, this effect is mainly due to

the redistribution of solar radiation on surfaces and slopes of different slope and aspect, which causes their unequal heating, and local redistribution of air masses. Spatial distribution of land surface temperatures can be effectively studied using remote sensing data in far-infrared range, which can be recalculated into temperature values.

The values of the land surface temperature in the Bystrytsia river basin were calculated with far-infrared channels of Landsat spatial images for three time slices: October 5, 2013, February 13, 2015, August 10, 2016. The statistical analysis has been carried out on the impact of terrain morphometric parameters and land surface type and characteristics on its temperature. To determine the relative influence of each specific factor, the method of hierarchical partitioning has been implemented with the *hier.part* package of R software environment. Significant seasonal differentiation of the influence of individual factors on temperature was revealed. During all the seasons of the year, absolute height appeared as the most significant factor among those analyzed. The influence of absolute height on temperature distribution was the strongest in autumn, somewhat weaker in winter and the weakest in summer. Artificial surfaces, dry grass and soil were heated more strongly despite their lower albedo due to smaller heat consumption by evaporation, whereas vegetation surface and wet soils were less heated. On the other hand, the influence of relative surface insolation, being differentiated by terrain elements appeared to be relatively weaker, which can be explained by the calculation method used (insolation has been calculated for the moment the images were taken, whereas surface heating takes some time).

The influence of the level of surface moisture also appeared to be significant.

Key words: land surface temperature, Landsat, Bystrytsia, morphometric parameters, hierarchical partitioning.

Вступ. Глобальні кліматичні зміни займають лідируюче місце у переліку глобальних екологічних проблем сучасності. До цієї проблеми прикута увага світової громадськості, впливових міжнародних інституцій, органів влади, засобів масової інформації. Швидкі зміни кліматичних умов, що їх очікують у різних частинах світу, матимуть вплив як на природні екосистеми, так і на людину, її життєдіяльність, різні галузі господарства. Адаптація до очікуваних змін клімату потребує інформації про характер таких змін. Її отримують шляхом кількісного моделювання, яке здійснюють на глобальному та регіональному рівнях (van der Linden & Mitchell, 2009).

На розподіл екологічно значущих кліматичних параметрів впливають як процеси глобального та регіонального рівнів (прозорість атмосфери щодо вхідної та вихідної сонячної радіації, глобальна та регіональна циркуляція атмосфери), так і процеси, які спричиняють локальну диференціацію кліматичних умов. Серед різноманітних кліматичних параметрів доволі значущих змін варто очікувати в параметрах, які пов'язані з температурним режимом. Інформація стосовно очікуваних змін у розподілі опадів, вітрового режиму, вологості повітря є недостатньо точною і часто суперечливою. Зокрема, глобальні моделі, здебільшого, прогнозують незначні зміни в сумарній річній кількості опадів у межах західних регіонів України (IPCC, 2014; Мкртчян, 2020; Бухта, Михнович і Мкртчян, 2021). Водночас, існує науковий консенсус стосовно очікуваного зростання глобальних температур повітря та обґрунтованої оцінки величини цього зростання в різних регіонах Землі залежно від реалізації того чи іншого сценарію скорочення викидів парникових газів. Наприклад, очікують, що в межах західних регіонів України наприкінці поточного століття (2081–2100) середньорічна температура повітря, порівняно з періодом 1986–2005 рр.,

підвищиться від 1,5 °C у випадку реалізації «радикального» сценарію скорочення викидів парникових газів RCP2.6 до 4–5 °C у разі реалізації «консервативного» сценарію RCP2.6 – мінімальне скорочення викидів парникових газів упродовж століття (IPCC, 2014; Мкртчян, 2020). Зазначимо, що температура приземного повітря та підстильної поверхні є потужним екологічним чинником, який визначає фізіологічні умови проживання рослин і тварин. Опосередкований вплив очікуваних змін теплового режиму відбуватиметься у вигляді зростання випаровуваності, унаслідок чого варто очікувати зменшення загальної вологозабезпеченості навіть за умови збереження теперішнього режиму та середніх кількостей опадів (Мкртчян, 2020).

Загалом, вирізняють три пануючі механізми просторової варіабельності приземної температури на локальному рівні: перерозподіл сонячної радіації на схилах і поверхнях різного ухилу та експозиції, який зумовлює їхнє неоднакове нагрівання; варіабельність у розподілі зволоження ґрунтів, яке внаслідок більшої теплоємності вологого ґрунту та втрати теплоти на випаровування впливатиме на ступінь нагрівання поверхні вдень та її охолодження вночі; дренаж холодного повітря, що впливає на його нагромадження вночі у пониженнях рельєфу з утворенням температурних інверсій (Fridley, 2009). Рельєф земної поверхні безпосередньо визначає перший і третій з цих механізмів, та опосередковано регулює другий (унаслідок впливу перерозподілу вологи на водний режим ґрунтів). У нашій праці (Mkrtchian & Kovalchuk, 2019) проаналізовано залежності між характеристиками морфології рельєфу та локальним просторовим розподілом температурних характеристик у межах Українських Карпат.

Вплив морфології рельєфу на термічні характеристики клімату проявляється неоднаково на різних масштабних рівнях. На найвищому рівні (горизонтальний масштаб десятки, сотні км і більше) він, насамперед, має форму висотної поясності (зональності) – зменшення температур (передусім максимальних) зі зростанням висоти. На цій закономірності базується виділення висотних еокліматичних поясів, межі яких часто проводять по горизонталях. Зменшення температур з висотою, зазвичай, супроводжується зменшенням річних та добових амплітуд температур, зсуванням сезонних піків максимуму і мінімуму річних температур у напрямі до кінця року, що надає клімату «морських» рис.

На детальнішому масштабному рівні (горизонтальний масштаб від десятків км і нижче) цей вплив передусім зумовлений: перерозподілом сонячної радіації на поверхнях і схилах різної крутості та експозиції, що спричиняє їхнє неоднакове нагрівання, та локальним перерозподілом повітряних мас – насамперед стіканням (дренажем) охолодженого повітря у нічний період і його концентрацією в локальних пониженнях рельєфу, що спричиняє формування приземних температурних інверсій і, як наслідок, зменшення мінімальних температур, збільшення повторюваності та інтенсивності заморозків у відповідних місцезоташуваннях. У попередньому дослідженні (Mkrtchian & Kovalchuk, 2019) охарактеризовано особливості впливу морфології рельєфу на розподіл температур повітря в Українських Карпатах, та на основі аналізу низки джерел визначено деякі орографічно зумовлені закономірності такого розподілу.

Детальне картування термічного режиму території на локальному рівні – складне завдання, адже мережа метеостанцій, на яких провадять регулярні спостереження за показниками кліматичних умов, насамперед в умовах України,

є доволі розрідженою. Предусім це стосується гірських регіонів; оскільки в Україні лише дві метеостанції (Плаї і Пожижевська) розташовані на висоті понад 1000 м н. р. м. На цьому тлі набувають значення методи спостереження за температурним режимом на основі сучасних супутникових технологій.

Хоча виміряти температуру приземного шару повітря безпосередньо дистанційними методами сьогодні проблематично, проте можна виміряти температуру діяльної (підстильної) поверхні, яка тісно пов'язана з першою. До того ж, на цій поверхні відбуваються процеси випаровування, конденсації, замерзання та відтаювання води, поблизу неї розташована більша частина кореневих систем рослин тощо, отож екологічна роль її температурного режиму доволі значима.

Низка систем супутникового зондування Землі провадить регулярні спостереження в далекому (термальному) інфрачервоному діапазоні спектра. Оскільки, згідно з законом Стефана-Больцмана, кількість енергії, яку випромінює одиниця поверхні за одиницю часу, пропорційна четвертому степеню її температури, то значення фіксованої сенсором енергії можна безпосередньо перевести у значення температури поверхні. Деякі методи здійснюють цей перерахунок з урахуванням властивостей поверхні, які спотворюють зазначену залежність та впливають на випромінювальну здатність поверхні (Li et al., 2013).

Метою нашого дослідження є вивчення сезонного розподілу температур підстильної поверхні території річкового басейну за даними інфрачервоних спектральних каналів космознімків серії Landsat, аналіз зв'язку між цим розподілом та деякими морфометричними параметрами рельєфу.

Методика досліджень. Районом нашого дослідження є басейн р. Бистриці загальною площею 2500 км², розташований у центральній частині Івано-Франківської області України, включаючи її адміністративний центр м. Івано-Франківськ (рис. 1). Бистриця – ліва притока Дністра, що впадає в Чорне море. Незважаючи на невелику площу, басейн Бистриці характеризується різноманітністю природних умов, типів землекористування та особливостей наземних покривів. Його північно-східну частину займають, здебільшого, широкі терасовані долини таких річок, як Бистриця Солотвинська, Бистриця Надвірнянська та Ворона. Південно-західна та південна частини басейну розташовані у низькогір'ї та середньогір'ї Карпат (з погляду фізико-географічного районування – області Зовнішніх та Вододільно-Верховинських Карпат). Найвищі частини басейну залягають у межах масиву Горгани. Абсолютні висоти в басейні коливаються від 201 м (поблизу гирла річки) до 1836 м (вершина г. Сивуля Велика).

Північно-східна (рівнинна) частина басейну р. Бистриці вкрита, здебільшого, переважно сільськогосподарськими угіддями, серед них трапляються невеликі ділянки широколистяних лісів (рис. 2). Є також урбанізовані території, насамперед – місто Івано-Франківськ та його околиці (площа 84 км²), міста Надвірна і Тисмениця. У гірській південно-західній частині басейну переважають лісові угіддя: змішані ліси в низькогір'ї і, здебільшого, хвойні ліси вище. Найвищі гребені та схили Горганського масиву вкриті кам'яними розсипами та осипищами.

Супутники серії Landsat здійснюють спостереження у далекому інфрачервоному діапазоні з 1982 р. (канал 6 сенсора Thematic Mapper, встановленого на супутнику Landsat 4). На борту супутника Landsat 8 встановлений термальний інфрачервоний сенсор TIRS, який здійснює знімання у двох спектральних каналах далекого інфрачервоного діапазону з роздільністю 100 м. Супутник Landsat 9, запущений у вересні 2021 р., містить сенсори з характеристиками, ідентичними до попереднього, що дає змогу не лише досліджувати сучасні особливості розподілу температури земної поверхні, а й аналізувати цей розподіл у динаміці за останні роки.

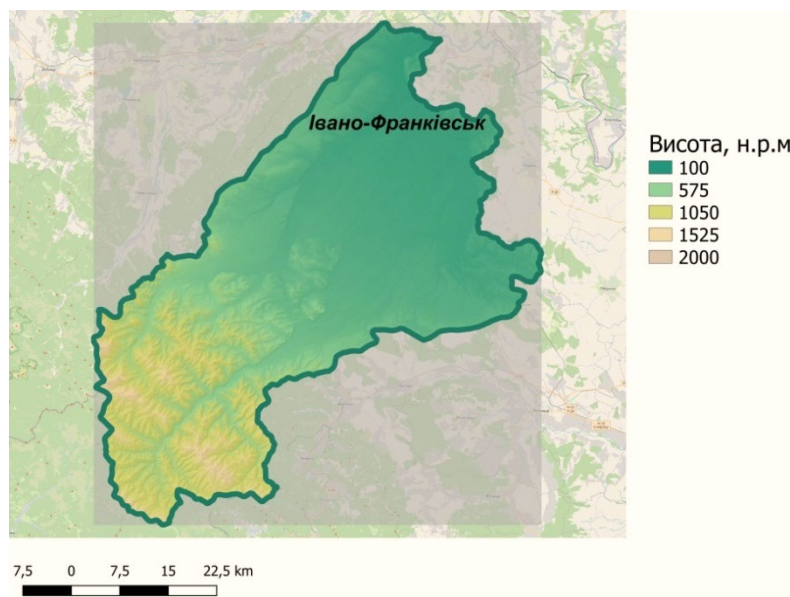


Рис. 1. Гіпсометрія басейну р. Бистриці
Fig. 1. Bystrytsia river basin hypsometry

Зауважимо, що йдеться про вимірювання температури поверхні землі (діяльної поверхні), яка загалом відрізняється від температури повітря. На температуру діяльної поверхні сильно впливають її фізичні характеристики, насамперед альbedo (відбивальна здатність) та зволоженість (від якої залежить частка енергії, витрачена на випаровування вологи та безпосередньо на нагрівання). Просторовий контраст у розподілі її температур загалом є більшим, ніж контраст у розподілі температур приземного шару повітря. Проте саме температура діяльної поверхні впливає на трав'янисту і чагарникову рослинність, розвиток багатьох сільськогосподарських культур, водний баланс земної поверхні.

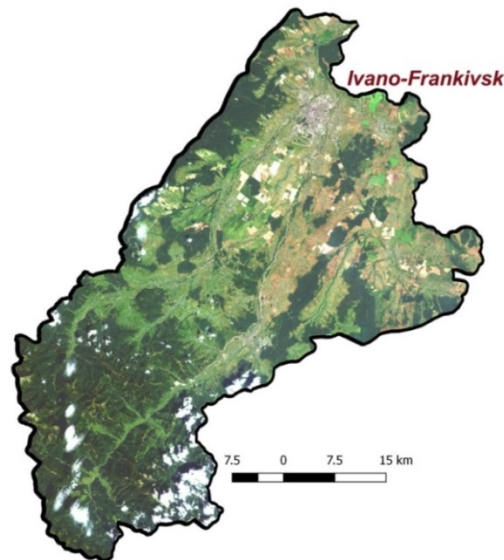


Рис. 2. Наземні покритви басейну р. Бистриця (композитне зображення Landsat, кольори близькі до природних)

Fig. 2. Bystrytsia river basin land cover (Landsat composite image, colors close to natural)

У нашій праці (Kovalchuk, Mkrthian & Kovalchuk, 2018) виконане картування температури земної поверхні для досліджуваного басейну за знімками Landsat за алгоритмом, який передбачав декілька кроків. Спершу значення пікселів відповідних каналів геозображення Landsat 8 перерахували у значення спектральної сяйності з використанням значень параметрів, які містяться у метаданих геозображення. На другому кроці сяйність перерахували у значення яскравісної температури з використанням термічних коефіцієнтів інфрачервоних діапазонів. Проте інтенсивність, з якою земна поверхня випромінює теплову енергію, загалом відрізняється від такої інтенсивності абсолютно чорного тіла, нагрітого до тієї ж температури. Ця інтенсивність також суттєво залежить від характеру рослинного покриву, зволоження поверхні та її шорсткості (Glenn et al., 2008). Саме тому застосовано ще одну формулу, яка дає змогу перерахувати значення яскравісної температури у реальну температуру земної поверхні. Ця формула, окрім кількох параметрів і констант, містить випромінювальну здатність – відношення між сяйністю відповідної поверхні і сяйністю абсолютно чорного тіла. Для поверхонь, повністю вкритих рослинністю, таке значення, зазвичай, вважають рівним 0,99, для оголених поверхонь – 0,97–0,98 (Sobrino et al., 2008). Для більшості реальних поверхонь, які вкриті рослинністю частково, беруть проміжне значення, виходячи з пропорції, наближенням до якої є відомий індекс NDVI, що його обраховують за червоним та ближнім інфрачервоним спектральними каналами. Детально зазначену методику описано у нашій праці (Kovalchuk, Mkrthian & Kovalchuk, 2018), де, зокрема, наведено згадані формули.

Важливе не лише отримання картини розподілу температур земної поверхні на деякий момент часу, а й вивчення (аналіз) чинників, які впливають на цей

розподіл. Такий аналіз, серед іншого, даватиме змогу спрогнозувати зміни температур у майбутньому під впливом тих або інших чинників, визначити найефективніші способи керування (наприклад, задля обмеження зростання температури) шляхом впливу на відповідні чинники.

У попередньому дослідженні (Mkrтчian & Kovalchuk, 2019) узагальнено основні закономірності впливу морфології рельєфу на приземну температуру та температуру підстильної поверхні в Українських Карпатах, наведено обрахунки значень коефіцієнтів кореляції температур підстильної поверхні та деяких морфометричних параметрів у межах зазначеного басейну. Проте коефіцієнти кореляції загалом не дають змоги визначити відносну значимість впливу різних чинників, оскільки ортогональні (взаємопов'язані між собою) чинники здатні маскувати або спотворювати цей взаємовплив. Окрім того, вплив морфометричних параметрів на розподіл температур продуктивніше розглядати у комплексі з впливом інших чинників, насамперед – характеру наземного покриття, стану рослинності та сільськогосподарських угідь.

Для визначення відносного впливу кожного конкретного чинника на результуючу ознаку доцільно застосовувати метод ієрархічного розбиття (*hierarchical partitioning*) (Chevan, 1991), реалізований у пакеті *hier.part* програмного середовища R. Відповідний алгоритм (реалізований функцією *hier.part* однойменного пакета) дає змогу створити таблицю, в якій наведено незалежний внесок кожної окремої змінної у модель, яка описує розподіл температури підстильної поверхні

Результати та обговорення. Нами обраховано значення температури підстильної поверхні території басейну у трьох часових зрізах: 5 жовтня 2013 р., 13 лютого 2015 р., 10 серпня 2016 р. (рис. 3). Усі зображення отримані близько 10:00 за Грінвічем, що відповідає 11:00 за зимовим київським часом та 12:00 за літнім київським часом. Методику (алгоритм) розрахунків наведено у праці (Kovalchuk, Mkrтчian & Kovalchuk, 2018). Оскільки три знімки охоплювали різні пори року, з'явилась можливість аналізу сезонної динаміки температури підстильної поверхні та її залежності від чинників впливу.

Можна візуально простежити вплив морфометрії рельєфу на розподіл температурних полів, передусім у гірській частині басейну. У рівнинній частині основним чинником просторової диференціації поля температур є відмінності в наземному покритті. Зокрема, лісові масиви є холоднішими від районів забудови та сільськогосподарських угідь, причому відмінність становить 1–2 °С на зимовому знімку, 3–4 °С на осінньому і 5–6 °С на літньому (порівняння з рис. 2). На рис. 4 відображено обраховані усереднені значення полів температури підстильної поверхні трьох часових зрізів. Зауважимо, що в різні сезони року висотні зміни температури є неоднорідними. У літній та осінній періоди температури зменшуються до висот 1200–1400 м н.р.м., після чого стабілізуються. В зимовий період, натомість, температури спадають до висоти 600–700 м н.р.м., далі стабілізуються до висот 1300–1400 м н.р.м., після чого знову знижуються з висотою (рис. 4, середній графік). Така особливість динаміки може залежати від розподілу снігового покриття, який суттєво зменшує нагрівання підстильної поверхні завдяки високому альбедо. В період отримання зображення сніговий покрив зберігався лише в днищах долин та у найвищих ділянках басейну. Водночас хвойні ліси характеризувались дещо нижчими

значеннями альбедо, отож температури діяльної поверхні під ними були не нижчими, ніж у днищах долин на менших абсолютних висотах. Влітку ділянки субальпійської рослинності та характерних для Горган скелястих виходів нагріваються краще від хвойних лісів, отож на графіку, що відповідає серпню, починаючи з висот 1300–1400 м н.р.м. температури припиняють спадати із висотою і навіть дещо зростають (рис. 4, нижній графік).

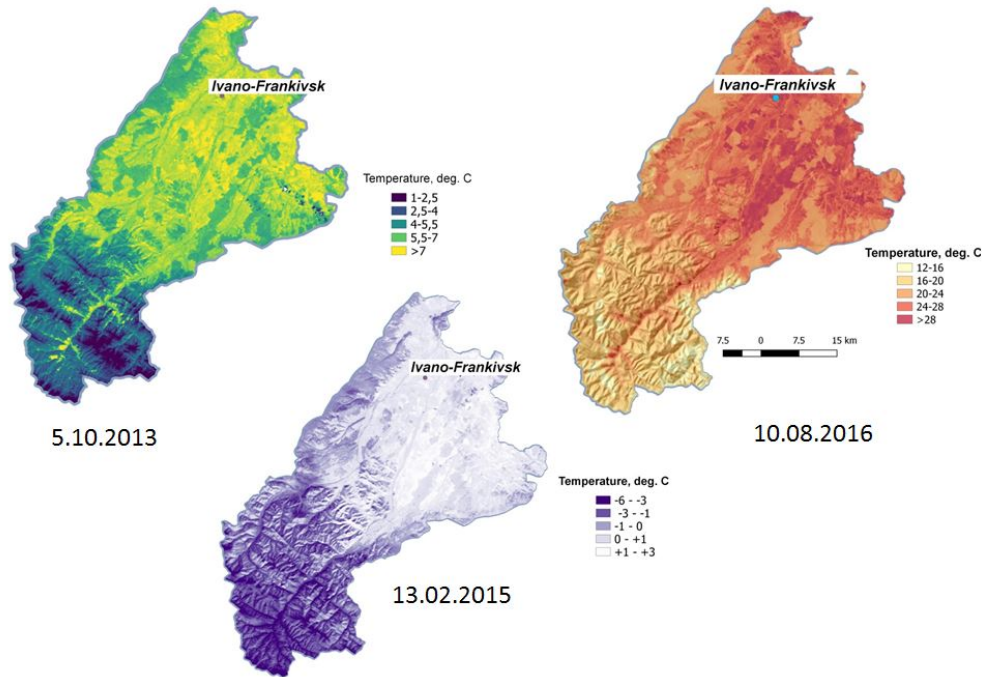


Рис. 3. Поля температур, обраховані для трьох часових зрізів
Fig. 3. Temperature fields calculated for three time slices

У таблиці 1 наведено результати статистичного аналізу зв'язку між температурою підстильної поверхні та деякими ймовірними чинниками. Окрім показників статистичного розподілу, наведено значення відносного впливу кожного чинника на температуру, обраховані методом ієрархічного розбиття (стовбчик *hp*). Зазначимо, що статистичний критерій *t*, який, зазвичай, використовують для визначення рівнів значимості впливу змінних, під час аналізу растрових шарів не дає змоги встановити значимість (*p*-рівень) зв'язку. Причина полягає в тому, що растровим геопросторовим даним, зазвичай, властива автокореляція, отож такі дані загалом не задовольняють вимоги незалежності, і кількість ступенів вільності в них є суттєво меншою від кількості пунктів спостережень (Мкртчян, 2018). У цьому випадку відносні значення критерію *t* характеризують лише внесок тієї чи іншої змінної у статистичну модель. У таблиці 2 наведено значення коефіцієнтів детермінації, які відображають рівень сумарного впливу усіх врахованих змінних на температуру підстильної поверхні у зазначений час (частку просторової варіабельності температури, яка описується цими змінними).

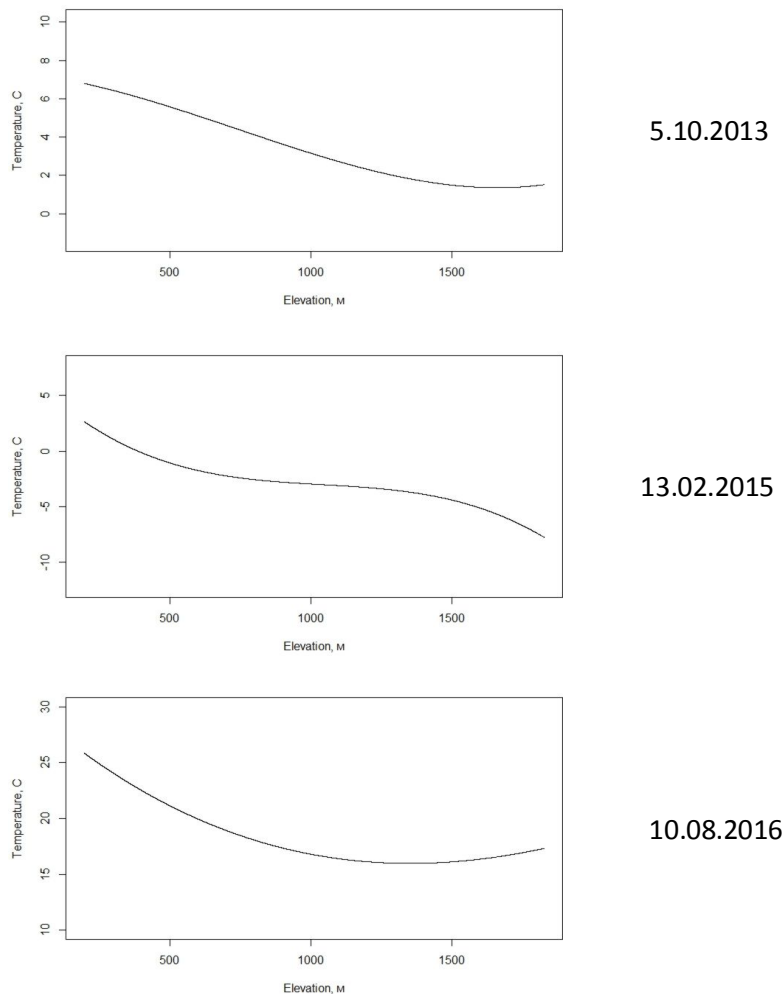


Рис. 4. Зміни середньої температури з висотою для трьох часових зрізів
Fig. 4. Altitudinal temperature changes for three time slices

Аналіз методом множинної регресії виявив, що головними чинниками впливу на температуру підстильної поверхні є висота над рівнем моря, потенційна інсоляція (обраховували як величину сонячної радіації, що надходить на одиницю площі діяльної поверхні повного ухилу та експозиції за умов безхмарного неба), альbedo поверхні, а також спектральні індекси, які обраховують за величиною відбивної здатності поверхні в каналах видимого діапазону спектра, а саме: індекс зволоженості поверхні (NDWI) та індекс продуктивності рослинного покриву (NDVI). Останні головним чином визначають співвідношення часток сонячної енергії, витраченої на нагрівання поверхні та на випаровування вологи.

Зауважимо, що вплив абсолютної висоти на розподіл температури був найбільшим восени, дещо меншим взимку і найменшим влітку. Натомість у літній період суттєво зростало значення альbedo поверхні. Причому, що парадоксально поверхні з більшим альbedo мали більшу температуру. Ймовірно,

Таблиця 1. Показники зв'язку між температурою підстильної поверхні та чинниками впливу: висотою над рівнем моря, індексом зволоженості поверхні NDWI, індексом продуктивності рослинного покриву NDVI, альбедо поверхні та інсоляцією, яка є функцією ухилу та експозиції елементів рельєфу.

Table 1. Indicators of relationships between land surface temperature and factors: elevation a.s.l., surface wetness index NDWI, vegetation index NDVI, surface albedo, and insolation as a function of surface slope and aspect

2013, 5 жовтня	бета	t	hp
Висота	-0.0038	-1619.3	72,86
NDWI	-38.8986	-517.3	10,64
NDVI	-34.105	-489,3	8,22
Альбедо	-0.0722	-2.25	6,15
Інсоляція	0.0012	139.8	2,13

2016, 10 серпня	бета	t	hp
Висота	-0,005	-968,9	41,19
NDWI	-42,55	-298,7	8,96
NDVI	-43,1	-327,1	13,15
Альбедо	45,46	349,6	35,72
Інсоляція	0,0017	101,6	0,97

2015, 13 лютого	бета	t	hp
Висота	-0,0037	-765,5	60,84
NDWI	-62,12	-554,6	16,29
NDVI	-54,07	-449,4	10,93
Альбедо	-8,097	-485,1	8,46
Інсоляція	0,0019	132,3	3,47

Таблиця 2. Загальна якість моделей множинної регресії для 3-х часових зрізів
Table 2. General quality of multiple regression models for three time slices

Дата	R ²
2013, 5 жовтня	0.8304
2015, 13 лютого	0.738
2016, 10 серпня	0,8354

Йдеться про сильніше нагрівання штучних поверхонь, сухої трави та сухого відкритого ґрунту. Попри більшу відбивну здатність, такі поверхні швидше нагріваються завдяки відсутності витрат тепла на випаровування. Натомість, поверхня рослинного покриву та вологих ґрунтів, з відносно меншим альбедо, нагрівається слабше, адже волога, яка випаровується з таких поверхонь, забирає тепло. Передбачувано, що індекс зволоження поверхні негативно корелює з температурами протягом усіх сезонів року. Вплив обрахованих значень інсоляції виявився неочікувано слабким, можливо, тому, що надходження сонячної радіації визначали на момент одержання геозображення, хоча через інерційність

процесу нагрівання на температуру більше впливало нагрівання поверхні у попередні (ранкові) години.

Висновки. Дистанційні зображення, що містять значення сяйності підстильної поверхні в далекому інфрачервоному діапазоні спектра є важливим джерелом даних для аналізу просторового розподілу температури земної поверхні. З цією метою перспективним є використання даних супутників серії Landsat, які збирають їх вже упродовж майже 40 років, а отже, дають змогу проаналізувати багаторічну динаміку температурного режиму земної поверхні. Для перерахунку значень сяйності у значення температури необхідно застосувати відповідні алгоритми.

Аналіз впливу рельєфу на термічний режим підстильної поверхні можна здійснювати методом множинної регресії, суміщаючи знімки з растровими шарами морфометричних характеристик рельєфу, отриманими під час аналізу цифрових моделей рельєфу. Такий аналіз для басейну р. Бистриці виявив низку цікавих закономірностей, зокрема в плані сезонної диференціації впливу окремих чинників.

Найбільшим недоліком використання геозображень серії Landsat для дослідження термічного режиму є те, що їх отримують приблизно в той самий час доби (11–12 година за місцевим часом), а отже, за супутниковими даними неможливо проаналізувати внутрішньодобову динаміку температур та їхній розподіл у нічний час (наприклад, для дослідження температурних інверсій).

Останніми роками з'явилися можливості швидкого та зручного аналізу великих масивів дистанційних зображень на основі онлайн-платформи хмарних обчислень Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Така платформа дає змогу статистично обробляти (зокрема, усереднювати) одразу велику кількість зображень, підібраних (відфільтрованих) за певними критеріями (рівень охоплення території впродовж певного діапазону часу, максимально допустимий відсоток покриття хмарами, той чи інший сезон року тощо). У майбутньому планують залучити цей інструмент для дослідження часової динаміки температури підстильної поверхні впродовж останніх десятиліть.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Chevan A., Sutherland M. Hierarchical Partitioning // *The American Statistician*. 1991. N 45. P. 90–96.
- Fridley, J. D. Downscaling climate over complex terrain: high finescale (<1000 m) spatial variation of near-ground temperatures in a montane forested landscape (great smoky mountains) // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2009. N 48. P. 1033–1049.
- Glenn E. P., Huete, A. R., Nagler, P. L., Nelson, S. G. Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape // *Sensors*. 2008. N 8 (4). P. 2136–2160.
- Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. // *Remote Sensing of Environment*. 2017. N 202. P. 18–27.
- IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

- Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
- Kovalchuk I. P., Mkrтчian O. S., Kovalchuk A. I. Modeling the distribution of land surface temperature for Bystrytsia river basin using Landsat 8 data // *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2018. № 27 (3). P. 453–465.
- Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR Sensors / Sobrino J. A., Jimenez-Munoz J. C., Sòria G., Romaguera M., Guanter L., Plaza A., Martínez P. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. N 46 (2). P. 316–327.
- Lenoir J., Hattab T., Pierre G. Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: implications for species redistribution // *Ecography*. 2017. N 40 (2). P. 253–266.
- Mkrтчian A., Kovalchuk I. Terrain morphology as factor of local temperatures distribution in Ukrainian Carpathians // *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій* : Зб. наук. праць. 2019. Вип. 1 (9). С. 62–72. <http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2019.1.2803>.
- Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives / Li Z. L., Tang B. H., Wu H., Ren H., Yan G., Wan Z., Trigo I. F., Sobrino J. A. // *Remote Sensing of Environment*. 2013. N 131. P. 14–37.
- van der Linden P., Mitchell J. F. B. (eds.) ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 2009. 160 p.
- Бухта І, Михнович А., Мкртчян О. Забруднення атмосферного повітря / *Геоecологія Львівської області: монографія*. Львів : Простір-М, 2021. С. 236–250.
- Мкртчян О. С. Оцінка рівня надійності лінійного зв'язку між просторово розподіленими автокорельованими змінними // *Вісник Львів. ун-ту. Сер. геогр.* 2018. Вип. 52. С. 201–209.
- Мкртчян О. С. Прояв кліматичних змін в західних регіонах України та їхній вплив на екосистеми, населення і господарство // *Конструктивна географія і картографія: стан, проблеми, перспективи* : матеріали міжнародної науково-практичної онлайн-конференції, присвяченої 20-річчю кафедри конструктивної географії і картографії Львівського національного університету імені Івана Франка (1–3 жовтня 2020, Львів). Львів : Простір-М, 2020. С. 85–88.

REFERENCES

- Chevan, A., Sutherland, M. (1991). Hierarchical Partitioning. In *The American Statistician*, 45, 90–96.
- Fridley, J. D. (2009). Downscaling climate over complex terrain: high finescale (<1000 m) spatial variation of near-ground temperatures in a montane forested landscape (great smoky mountains). In *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48, 1033–1049.
- Glenn, E.P., Huete, A.R., Nagler, P.L., Nelson, S.G. (2008). Relationship between remotely-sensed vegetation indices, canopy attributes and plant physiological processes: what vegetation indices can and cannot tell us about the landscape. In *Sensors*, 8(4), 2136–2160.

- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. In *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Kovalchuk, I. P., Mkrтчian, O. S., Kovalchuk, A. I. (2018). Modeling the distribution of land surface temperature for Bystrytsia river basin using Landsat 8 data. In *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27(3), 453–465.
- Lenoir, J., Hattab, T., Pierre, G. (2017). Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: implications for species redistribution. In *Ecography*, 40(2), 253–266.
- Li, Z. L., Tang, B. H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I. F., Sobrino, J.A. (2013). Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives. In *Remote Sensing of Environment*, 131, 14–37.
- Mkrтчian, A., Kovalchuk, I. (2019). Terrain morphology as factor of local temperatures distribution in Ukrainian Carpathians. In *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent areas*, 1(9), 62–72. <https://doi.org/10.30970/gpc.2019.1.2803>.
- Sobrino, J.A., Jimenez-Munoz, J.C., Sòria, G., Romaguera, M., Guanter, L., Plaza, A., Martínez, P. (2008). Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR Sensors. In *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46 (2), 316–327.
- van der Linden, P., Mitchell, J. F. B. (eds.) (2009). *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.
- Buhta, I, Mykhnovych, A., Mkrтчian, O. (2021). Zabrudnennia atmosfernoho povitria. [Atmospheric air pollution]. In: *Geoecology of Lviv region*. Lviv : Prostir–M, 236–250. (In Ukrainian).
- Mkrтчian, O. (2020). Proyav klinmatychnykh zmin v zahidnykh regionah Ukrainy ta yihniy vplyv na ekosystemy, naseleння ta hospodarstvo [Manifestation of climate changes in western regions of Ukraine, and their influence on ecosystems, population, and economy]. In: *Constructive geography and cartography: state, problems, perspectives. Proc. of int. sc. and pract. online conference, dedicated to 20th anniversary of Department of Constructive Geography and Cartography of Ivan Franko National University of Lviv*. Lviv : Prostir–M, 85 – 88. (In Ukrainian).
- Mkrтчian, O. (2018). Assessment of reliability of linear relationship between spatially distributed autocorrelated variables. In *Visnyk of the Lviv University. Seriya Geografichna*, 52, 201–209. (in Ukrainian).