

the Kirovograd region) and sweet silique (in the east of the region). Of the families of flowering plants, the most widely represented are Aster (Compositae), a significant place is occupied by Cabbage (Cruciferous), Thin-legged (Cereals), Legumes and others.

Factors contributing to the naturalization of invasive species and their rapid displacement of aboriginal flora are various. The main ones are eurybiont, unpretentious to the conditions of the habitat, the significant size of the aboveground phytomass.

The internal diversity in the invasive flora of the region's railways is mainly due to the influence of the factor of the sectoral nature of natural conditions within the territory rather elongated from west to east. Therefore, in the presence of clear common features characterizing the invasive flora of the region, the differences associated with predominance of moisture-loving plants in the western part of the region and drought-resistant plants in the eastern part are noticeable.

The practical use of the study results is associated with the possibility of improving the system of measures to combat phytoinvasions, taking into account the geographical features of the spatial distribution of individual species.

Results of the investigation may be used during realizing tasks of ecologization of land using, especially defining priorities in the struggle with invasive species of the plants of railways. Discovered internal differentiation in expansion different allied species in Kirovohrad region gives a ground for defining the most important factors of distortion natural biodiversity in its different parts. Studying space peculiarities of expansion allied flora has a significance for create concrete actions directed to renewing initial space composition of phytocenosis and landscapes distorted by invasions.

Key words: invasive flora, railway tracks, Kirovohrad region, adventitia, ragweed, grindelia spread, itching eastern.

Надійшла 09.08.2021 р.

УДК 911.2+630*5

DOI:<https://doi.org/10.25128/2519-4577.21.2.6>

Анатолій СМАЛІЙЧУК, Іван КРУГЛОВ, Олег ЧАСКОВСЬКИЙ,
Ганна СМАЛІЙЧУК, Володимир БЛАНЮК

КЛІМАТОРЕГУЛЮВАЛЬНІ ЕКОСИСТЕМНІ ПОСЛУГИ ЛІСОВОГО ЛАНДШАФТУ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

Індикатором кліматорегулювальних послуг обрали температуру земної поверхні (ТЗП), яку відображає термальний інфрачервоний канал космозображень Landsat. Тоді визначили перелік ландшафтно-екологічних чинників ТЗП та з'ясували величину їхнього впливу на ТЗП за допомогою методу підсиленних регресійних дерев. З'ясували, що зімкнутість деревостану є найважливішим чинником. Другим за значимістю виявився чинник експозиції схилу.

Ключові слова: лісовий ландшафт, екосистемні послуги, кліматорегулювання, космозображення Landsat, геотеледетекція, зміна клімату, Українські Карпати.

Постановка науково-практичної проблеми, актуальність і новизна дослідження. Ефективний менеджмент ландшафтів як геопросторово диференційованих екосистем (гео-екосистем) [4] є невід'ємною складовою сталого розвитку суспільства. Це зазначено як в низці міжнародних конвенцій, ратифікованих Україною [3], так і в національній Стратегії екологічного розвитку нашої держави [2]. Для його здійснення передусім необхідне картування ландшафтів з подальшою оцінкою потенціалу та актуального стану різних екосистемних послуг (ЕП), які вони надають. Як досліджено раніше, природні екосистеми, порівняно з антропогенно зміненими, мають більший потенціал різноманітних послуг [12]. Зокрема, близькі до природних лісові ландшафти здатні надавати усе різноманіття ЕП – постачальних, підтримувальних та регулювальних, а також культурних [17]. Для постачальних послуг існують ринкові механізми ціноутворення,

тому їх досить легко оцінити у грошовому вимірі. Культурні ЕП міцно вкорінені в індивідуальній та суспільній свідомості як важливі для підтримки фізичного та психічного здоров'я людей. А от підтримувальні та регулювальні ЕП зазвичай залишаються поза увагою прямих та опосередкованих споживачів. Серед регулювальних ЕП слід виділити кліматорегулювальну функцію лісових ландшафтів.

Протягом останніх десятиліть ліси почали розглядати як один з важливих чинників протидії глобальній зміні клімату та подолання його негативних наслідків. Лісові екосистеми мають два механізми впливу на клімат. По-перше, вони зменшують загальну концентрацію карбону в атмосфері через його депонування у біомасу, і у такий спосіб пом'якшують зміну клімату на глобальному рівні. По-друге, щільний лісовий намет запобігає перегріванню поверхні ґрунту та сприяє збереженню вологи на локальному рівні. Таке розуміння кліматорегу-

лювальних ЕП відображене зокрема у Спільній міжнародній системі класифікації екосистемних послуг (CICES) [10].

Варто зауважити, що потенціал та фактичний стан надання ЕП, пов'язаних із регулюванням клімату, прямо залежить від ступеня природності конкретної лісової екосистеми та її біомаси [22]. Листяні ліси можуть утримувати більше вологи і таким чином надавати більший обсяг кліматорегулювальних ЕП. Наявність мертвої деревини у лісі також підвищує загальний обсяг біомаси і у такий спосіб впливає на місцевий термічний режим. Пралісові та старовікові лісові екосистеми, які найменшою мірою зазнали антропогенного впливу та трансформації, можуть мати значний потенціал надання кліматорегулювальних ЕП. Найбільше таких лісів в Україні ідентифіковано в межах Карпатського регіону, що зумовлено високою природною лісистістю та особливостями землекористування у гірській місцевості. Загалом в Українських Карпатах виявлено близько 95 тис. га пралісів та старовікових лісів, з яких 40 % досі не мають природоохоронного статусу [8]. Важливість збереження таких лісів не обмежується лише дослідницьким, природоохоронним чи естетичним інтересами, а й їхньою здатністю пом'якшувати зміну клімату та її ефекти.

Аналіз останніх публікацій за темою дослідження. На даний час існує низка досліджень, як вітчизняних, так і міжнародних, які присвячені особливостям просторового розподілу температури приземного шару повітря або температури земної поверхні, зокрема у лісових ландшафтах [1, 6, 7, 9, 16]. У цих публікаціях використовують дані, зібрані на метеостанціях або ж отримані засобами геотеледетекції (переважно сателітними сенсорами). У деяких студіях розглянули вплив геоморфометричних показників на розподіл температури [6], а також побіжно згадано про вплив наземного покриву на температурні показники [9]. Так, дослідження, виконані для бореальних лісів Північного Сходу США, засвідчили значно більший потенціал старих (стиглих та перестійних) лісів щодо регулювання місцевого клімату [20]. Однак такі дослідження відсутні для території України.

Постановка завдання. Цією публікацією ми намагаємося заповнити цю прогалину. Отже, метою цього дослідження є з'ясування кількісних показників та особливостей просторового розподілу, зокрема структурно-екологічних детермінантів, кліматорегулювальних ЕП лісового ландшафту Українських Карпат з наявними пралісами та старовіковими дерево-

станами як тестової ділянки.

Концептуальні засади. У нашому дослідженні під ЕП розуміємо усі матеріальні та нематеріальні вигоди, які людина отримує в результаті взаємодії з природним або антропогенно зміненим ландшафтом як геоекосистемою [4, 17]. Кліматорегулювальні ЕП для потреб цього конкретного дослідження редуковано до можливості ландшафту регулювати локальний термічний режим. Тому температуру земної поверхні (ТЗП) розглядаємо як властивість ландшафту, яка відображає фактичний стан надання кліматорегулювальних ЕП в частині термічного режиму.

Територія дослідження охоплює головно Рахівський та Тячівський адміністративні райони Закарпатської області і визначається покриттям космозображень Landsat 8 (WRS path 185 row 026). До дослідження також залучена суміжна територія Хустського району із Уголько-Широколужанським масивом букових пралісів Карпатського біосферного заповідника задля вивчення впливу сусідства природних лісів на ТЗП суміжних лісових ландшафтів.

Загалом площа дослідження становить 384 тис. га. Вона є репрезентативною для регіону Українських Карпат, оскільки охоплює увесь спектр альтitudних біокліматичних зон, що зокрема відображено у видовій структурі природних лісів, які збереглися в її межах. Тут присутні дубові, дубово-букові, чисті букові, буково-смерекові та смерекові ліси [5]. Близько 2/3 території дослідження займають сильноспадисті (12-20°) та круті (> 20°) схили, на яких в минулому зростали переважно чисті букові та мішані смереково-ялицево-букові ліси.

Для детальнішого вивчення чинників геопросторової диференціації кліматорегулювальних ЕП в межах території дослідження обрали ключову ділянку – басейн потоку Великий (притока Тиси) площею 4059 га. Ділянка характеризується віковим та видовим різноманіттям лісових екосистем, а також містить у своїх межах порушені та природні ліси (Рис. 1).

Матеріали і методи. Виконання дослідження загалом можна поділити на кілька послідовних етапів: 1) підготовка основних наборів даних; 2) створення репрезентативної вибірки та виконання оверлейного аналізу; 3) статистичний аналіз залежностей між ТЗП та іншими екологічними властивостями ландшафту. На першому етапі опрацювали геодані: привели їх до спільної системи координат (WGS84, UTM Zone 34 N) та виконали маскування території дослідження. Також, на основі

глобальних растрових даних про деревний покрив та його втрати [13], створили геопросторовий шар лісового покриву станом на 2000 р. з роздільною здатністю 30 м. Для цього із вихідних даних відібрали комірки з деревним покривом понад 30% та вилучили “острівні” ареали площею менше 1 га. Тоді застосували цей шар як маску для відбору комірок щодо

втрат лісового покриву у період 2001-2015 рр. У такий спосіб отримали два растрові набори даних, які відображають: 1) усі лісові території та 2) “порушені ліси” із зазначенням року порушення. Наступним кроком було опрацювання векторних даних про ділянки пралісів та старовікових лісів, ідентифікованих станом на

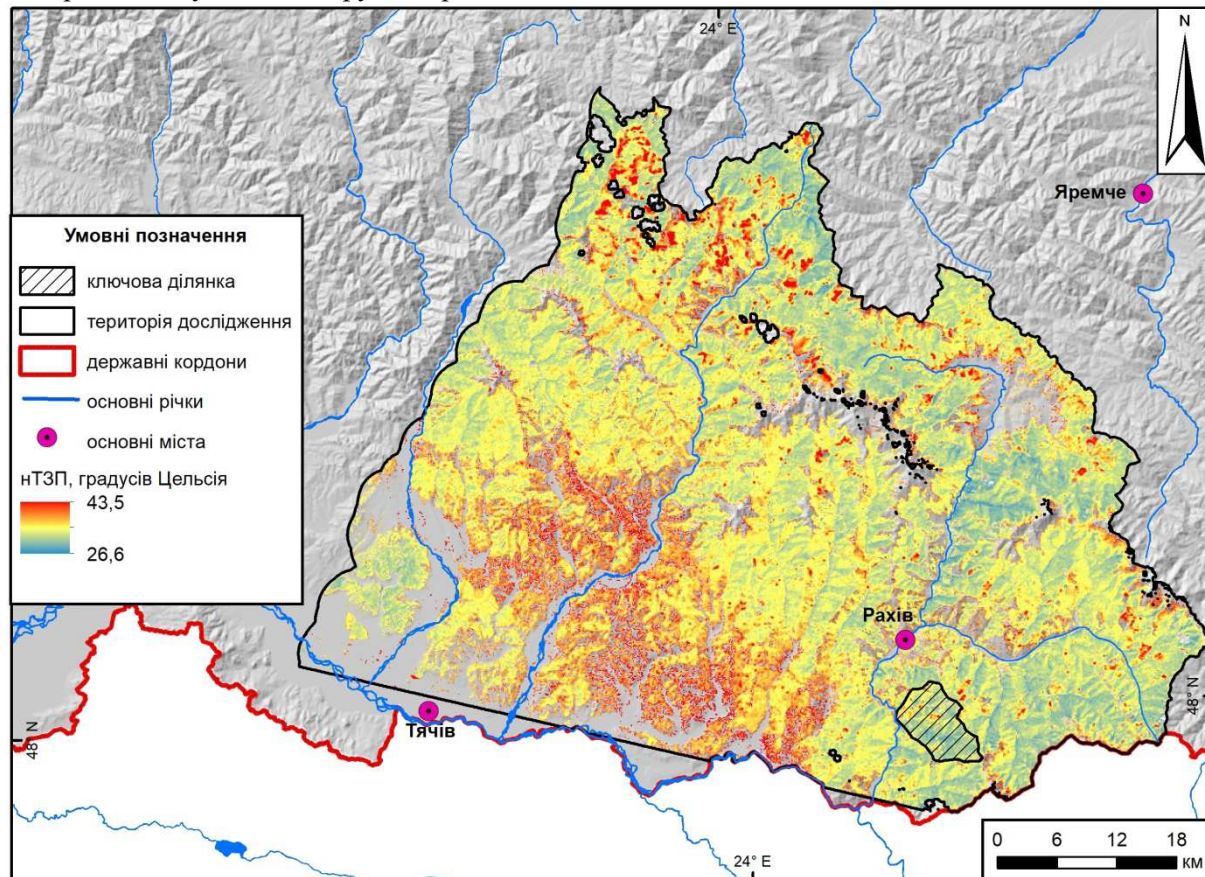


Рис. 1. Розташування території дослідження та розподіл нТЗП (пояснення у тексті)

1 січня 2018 р. [8], для створення шару, що відобразатиме клас “природні ліси”. Спочатку з вихідного шару нами було виключено усі лісові виділи, у яких домінували сосна гірська та вільха зелена, які репрезентують пояс субальпійського криволісся. Далі усі полігони в межах шару об’єднали задля визначення сумарної площі масивів, що утворені суміжними полігонами в межах зазначеного шару. Для подальшого аналізу залишили лише ті лісові масиви пралісів та старовікових лісів, які мали площу понад 50 га, і таким чином створили новий векторний шар, що відповідає класу “природні ліси”. У такий спосіб усі ліси поділили на три класи: “природні ліси” (*OGF*), “порушені ліси” (*DistF*) та “інші ліси” (*OthF*). До першого належать природні (старовікові ліси або праліси). У разі наявності порушень, комірка, що належала до класу “природні ліси”, зараховувалась до класу “порушені ліси”. Цей клас охоплює усі комірки, у яких зафіксовані втрати лісового покриву – як природні (вітровали,

буреломи, пожежі, лавини), так і антропогенні (лісозаготівля, знеліснення при будівництві тощо). До класу “інші ліси” віднесли усі лісові території, які не зазнали порушень у період 2001-2015 рр. та водночас не належать до класу “природні ліси”. Вони характеризуються спрощеною віковою та видовою структурою. Геопросторовий розподіл усіх трьох класи лісів відобразили одним растровим шаром.

На завершення першого етапу опрацювали дані геотеледетекції щодо ТЗП. Це космозображення Landsat 8 від 5 червня та 8 серпня 2015 р., виконані об 11:14 за поясним часом, з мінімальним вкриттям хмарами. Опрацювання обох зображень окремо у тепловому інфрачервоному каналі (band 10) виконали за алгоритмом, який полягає у перетворенні цифрових значень на космознімках у значення ТЗП з використанням “хмарного” сервісу Google Earth Engine [11]. Далі здійснили “маскування” комірок з хмарами та тінями від хмар. Для цього скористалися даними QA band. Далі для кож-

ної пари комірок з обох космозображень обрахували середнє значення ТЗП. У підсумку отримали новий геопросторовий шар ТЗП території дослідження для літнього сезону 2015 р. в умовах спекотної сухої погоди. Для компенсації вираженої альтитудної диференціації ТЗП в умовах гірського ландшафту виконали нормалізацію її значень з використанням термального градієнта – $0,6^{\circ}$ С на 100 м. Отриманий у такий спосіб геопросторовий шар нормалізованої ТЗП (нТЗП) характеризує актуальний стан надання кліматорегулювальних ЕП у літній сезон 2015 р.

Допоміжні геодані про екологічні характеристики ландшафту, а саме: альтитуду (*elv*), ухил поверхні (*slp*), експозицію схилу (*asp*), індекс топографічного положення (*TPI*) обчислили на підставі цифрової моделі висот SRTM [4, 15]. За допомогою функції сусідства створили окремих геопросторовий шар, який вказує на наявність порушень лісового покриву в околі розміром 90×90 м (*nb_frs_ls*). Геопросторовий шар, що характеризує зімкнутість деревостану у кожній комірці растру (*frs_cov*) також використали для подальшого статистичного аналізу. Окрім того, для класу “природні ліси” побудували бінарний геопросторовий шар, що вказує на переважання хвойних або листяних порід в межах лісового виділу (*sp_dom*), а також шар із зазначенням часу, що минув від моменту втрат лісового покриву (*frs_ls_yr*) для класу “порушені ліси”.

Наступним етапом дослідження було створення репрезентативної вибірки для всіх трьох класів лісу для подальшого статистичного аналізу. Загалом територія дослідження, вкрита лісом, становить близько 290 тис. га, що відповідає понад 3.2 млн. комірок растру. За допомогою методу пропорційної стратифікованої випадкової вибірки ми сформували підсумковий масив даних розміром 10 % від загальної чисельності комірок. Додатково, для уникнення просторової автокореляції, встановили мінімальну відстань між комірками вибірки у 100 м. Далі для цієї вибірки виконали оверлейний аналіз з геопросторовими шарами, які відображають екологічні характеристики ландшафту, а також з шаром нТЗП. Таким чином отримали фінальний набір даних для виконання статистичного аналізу. Для ключової ділянки створили аналогічний набір, але до вибірки залучили усі точки, що відповідають центрам комірок растру нТЗП – загалом 33 808 одиниць.

Завершальний крок дослідження виконали з використанням методу підсилених регресійних дерев [14]. Цей метод машинного

навчання для статистичного аналізу даних дає можливість виявляти складні нелінійні залежності між змінними. Він широко використовується у природничих дослідженнях, зокрема для з'ясування геопросторових чинників різних явищ [18, 19]. Насамперед виконали перевірку незалежних змінних на наявність взаємної кореляції та встановили порогове значення коефіцієнта кореляції Пірсона у 0,75. Для усієї території дослідження, на підставі репрезентативної вибірки, створили три “глобальні” статистичні моделі впливу екологічних чинників ландшафту на ТЗП для кожного з трьох класів лісів. Також побудували аналогічні “локальні” моделі для кожної альтитудної біокліматичної зони. У цьому дослідженні ми використали таку схему альтитудної диференціації біокліматичних зон Українських Карпат: 1) дубовий; 2) дубово-буковий; 3) буковий; 4) буково-смерековий; 5) смерековий; 6) субальпійський; 7) альпійський [5]. Для потреб нашого дослідження цю схему модифіковано таким чином, щоб межі зон проходили рівно через кожні 300 м альтитуді. Натомість для ключової ділянки створили три статистичні моделі, кожна з яких окремо описує зв'язки просторових чинників та ТЗП для кожного з трьох класів лісу. На основі інформації з лісотаксаційних матеріалів до цієї моделі додатково залучили два чинники – запаси деревини в $\text{м}^3/\text{га}$ (*stk_m3ha*), а також середній вік дерев першого ярусу (*age_2015*).

Викладення основного матеріалу. Загалом в межах території дослідження розподіл трьох лісових класів був таким: 13.79 % – “природні ліси”, 5.96 % – “порушені ліси” та 80.25 % – “інші ліси”. Першим проміжним результатом дослідження можна вважати показники нТЗП для цих трьох класів загалом, а також в розрізі кожної альтитудної біокліматичної зони (рис. 2). Отримані результати вказують на те, що абсолютні максимальні значення нТЗП в межах однієї альтитудної зони є найнижчими у “природних лісів”, а найвищими – у “порушених”. Така ж закономірність характерна для показника середньої нТЗП в межах більшості альтитудних зон. Натомість абсолютні мінімальні значення нТЗП у більшості альтитудних зон виявилися меншими в “інших лісах”, ніж у “природних”. Це можна пояснити першочергово різницею у величині вибірки між класами. Також варто відзначити значно менші діапазони значень нТЗП, зафіксовані для “природних лісів” (від $5,8$ до $10,7^{\circ}$ С) у порівнянні з двома іншими класами (від $11,0$ до $16,3^{\circ}$ С), що може вказувати на кращий потенціал перших надавати кліматорегулю-

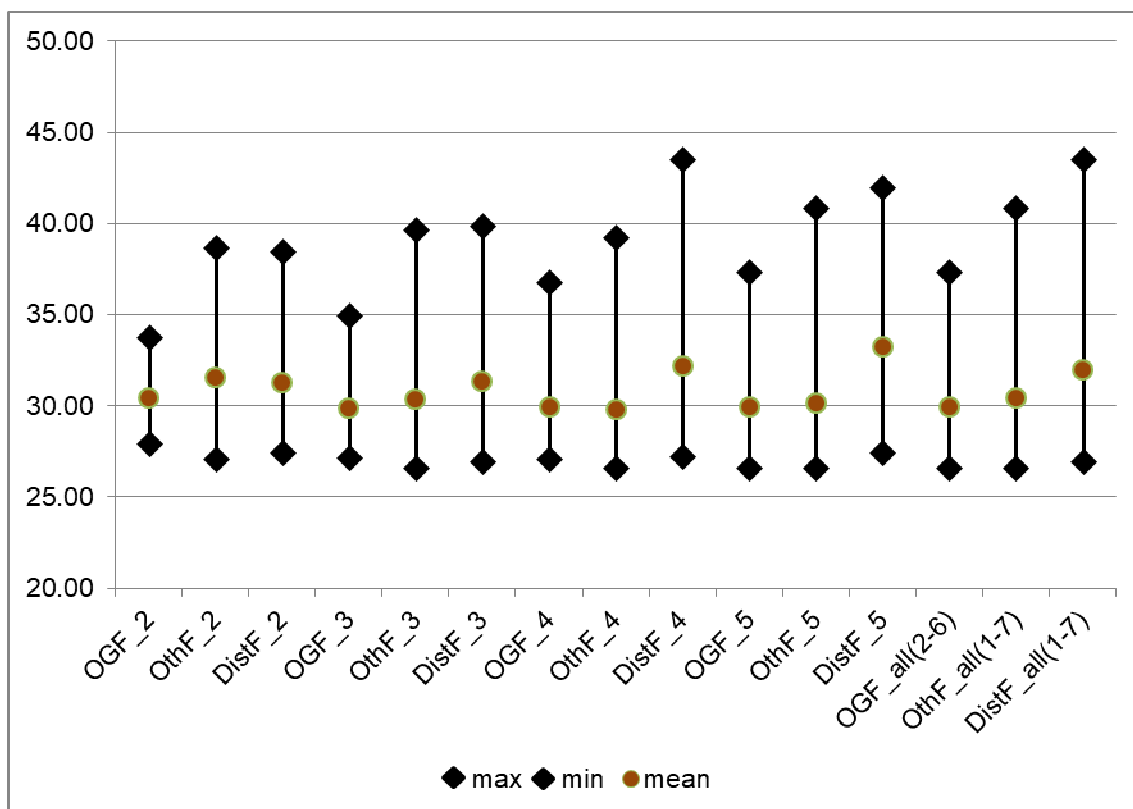


Рис. 2. Розподіл нТЗП за класами лісів та альтитудними біокліматичними зонами в межах усієї території дослідження

* Назва класу лісів вказана латинськими літерами; цифра після нижнього тире відповідає порядковому номеру біокліматичного поясу (див. текст)

Просторовий розподіл нТЗП, попри нормалізацію, все ще вказує на зв'язок з альтитудою (див. рис. 1). Щоправда, перевірка на наявність кореляція засвідчила її помірні значення, через що цей чинник потрапив в остаточні варіанти моделі. Також помітні значні температурні аномалії у північній частині території – у місцях проведення суцільних лісових рубок, де різниця у показниках нТЗП на відстані 100 м сягає подекуди 5° С.

Наступним і головним результатом дослідження стали дані статистичного аналізу, що допомагають зрозуміти вплив різноманітних чинників на кліматорегульовальні ЕП лісів Українських Карпат (табл. 1). Вони дають розуміння вкладу окремих чинників у пояснення загальної дисперсії показників нТЗП, а також містять показник точності побудованої моделі – частку загальної дисперсії, яку пояснює модель. Загалом три “глобальні” моделі пояснюють від 42 до 50 % загальної дисперсії показників нТЗП, в той час як у випадку “локальних моделей” цей показник варіює від 32 до 74%. У середньому він становить ~45 % для “локальних” моделей та ~47 % для “глобальних”. Варто відзначити значні відмінності між трьома виділеннями класами лісів. У природних лісах найвпливовішими чинниками прос-

торової диференціації нТЗП виявилася експозиція схилів, зімкнутість деревостану, а також альтитуда. У “локальних” моделях природних лісів, побудованих для окремих біокліматичних зон, також у більшості випадків впливовим був чинник експозиції схилу. Дещо рідше переважаючу вагу мали чинники топографічного положення та альтитуди. Натомість надзвичайно маловпливовими у “локальних” моделях природних лісів були чинник ухилу поверхні та наявності втрат лісу по сусідству. Цікавою є виявлена тенденція щодо зменшення впливу геоморфометричних чинників (топографічного положення, альтитуди та ухилу) для моделей класу “природних лісів” при переході від теплих до прохолодніших біокліматичних зон. Водночас зростає вплив чинників, що безпосередньо характеризують стан лісового ландшафту – зімкнутість деревостану, переважаюча порода.

Для лісових ландшафтів, які зазнали порушень (клас “порушені ліси”), найвпливовішими чинниками нТЗП, як у “глобальній”, так і “локальних” моделях, виявилися показники часу втрати лісового покриву та сусідство порушених ділянок лісу. Найменш значимим, як і у випадку з класом “природних лісів”, виявився чинник ухилу поверхні. Для усіх моделей,

побудованих для класу “інші ліси”, найбільший внесок у пояснення загальної дисперсії нТЗП має показник зімкнутості деревостану – від 24 до 63 %. Дещо менший вплив мали фактори топографічного положення та альти-туди, а найменший – ухилу поверхні.

Загалом у дванадцяти “локальних” та трьох “глобальних” статистичних моделях найчастіше (по дев’ять разів) впливовими чинниками були зімкнутість деревостану та експозиція схилу. При цьому для всіх трьох класів лісів перший із згаданих чинників мав найбільший вклад у пояснення загальної дисперсії у моделях побудованих для смерекового поясу, в

той час як для чинника експозиції це характерне для буково-смерекового поясу.

Варто зазначити, що перелік чинників, які включили для трьох груп моделей незначно відрізнявся залежно від їхньої релевантності для відповідного класу лісу. Також відзначаємо, що розподіл лісових класів за альти-тудними біокліматичними зонами був нерівномірним, зокрема найбільша частка припадала на зону букових лісів. Через це кількість індивідуальних зразків, включених у “локальні” статистичні моделі є неоднаковою, що частково пояснює відмінності у частці дисперсії, яку пояснює та чи інша модель.

Таблиця 1

Параметри статистичних моделей побудованих для усієї території дослідження

Статистична модель*	Чинники**								Пояснена дисперсія, %
	frs_cov	elv	slp	asp	TPI	nb_frs_ls	sp_dm	frs_ls_yr	
OGF 2	7.33	33.71	11.97	10.67	31.50	1.11	3.72		74.04
OGF 3	11.65	13.97	10.40	24.44	24.45	3.75	11.34		41.09
OGF 4	21.34	13.19	5.04	35.55	14.22	4.31	6.35		36.30
OGF 5	30.90	6.23	4.84	27.00	7.47	4.93	18.63		47.95
OGF G	23.15	17.22	3.74	30.71	12.68	3.60	8.90		42.06
DistF 2	16.49	16.76	13.87	8.01	18.88	6.74		19.25	39.83
DistF 3	8.54	10.97	10.12	15.19	16.21	13.71		25.26	42.56
DistF 4	4.79	9.16	4.78	15.41	4.39	26.58		34.88	47.90
DistF 5	9.06	13.63	6.34	9.52	7.73	30.87		22.84	53.95
DistF G	4.47	20.33	3.28	14.41	4.66	22.14		30.70	50.46
OthF 2	47.87	10.13	15.48	7.37	18.70	0.45			32.38
OthF 3	28.08	17.36	11.66	19.19	21.27	2.43			40.27
OthF 4	24.43	8.38	5.33	29.23	15.03	17.60			35.17
OthF 5	62.71	7.90	2.20	10.39	3.93	12.86			46.86
OthF G	26.56	46.89	3.58	10.21	9.07	3.68			48.02

* Назва локальної статистичної моделі складається з назви класу лісу (напр., OGF – “природні ліси”) та порядкового номера альтitudної біокліматичної зони (напр., 3 – буковий; див. перелік усіх зон у тексті). Глобальні моделі позначені натомість у кінці літерою G.

** Значення, виділені **потовщенням шрифтом**, мають внесок у загальний результат на рівні вищому за випадкове значення (100 % / кількість чинників у моделі).

Дещо відмінними виявилися результати статистичного аналізу чинників нТЗП в межах ключової ділянки (табл. 2). Насамперед варто відзначити значно більше значення загальної дисперсії, яку пояснюють три моделі – від 77 до 89 %. Також досить подібними виявилися набори статистично значимих чинників у всіх моделях. Для моделей “природних лісів” та “інших лісів” найвпливовішим чинником виявилась експозиція схилу, а для інших трьох моделей – запаси деревини, вік та альтitudа. Для “порушених лісів” основний внесок у

пояснення загальної дисперсії (25 %) має фактор часу порушення деревостану (напр., внаслідок вирубки), а також запаси деревини, альтitudа та переважаючий тип порід першого ярусу. Отже, залучення додаткових факторів для побудови статистичних моделей ключової ділянки не лише значно підвищило якість моделі, але й змінило перелік впливових чинників. Попри це, альтitudа й експозиція схилу в обох випадках найчастіше потрапляли до числа статистично значимих факторів.

Таблиця 2

Параметри статистичних моделей побудованих для ключової ділянки дослідження

Статистична модель	Чинники*									Пояснена дисперсія, %
	frs_cov	elv	slp	asp	TPI	nb_frs_ls	sp_dm	frs_ls_yr / age_2015**	stk_m3ha	
OGF_KA_G	8.39	15.74	8.25	19.84	8.43	5.15	6.1	13.32	14.78	87.7

DistF KA G	1.04	14.85	7.71	9.1	8.66	6.97	12.46	24.93	14.28	88.71
OthF KA G	5.19	12.26	2.72	28.29	10.03	8.15	1.98	18.08	13.29	77.4

* Значення, виділені потовщеним шрифтом мають внесок у загальний результат на рівні вище випадкового (100 % / кількість чинників у моделі)

** Чинник часу, що минув від моменту порушення деревостану (*frs ls yr*), використали у моделі *DistF_KA_G*; чинник віку дерев першого ярусу (*age_2015*) залучили до моделей *OGF_KA_G* та *OthF_KA_G*.

Висновки та перспективи використання результатів дослідження. Це дослідження демонструє можливості використання відкритих даних геотеледетекції щодо ТЗП для кількісної оцінки фактичного стану надання кліматорегулювальних ЕП на прикладі лісових ландшафтів Карпат. Статистичний аналіз чинників просторової диференціації показників нТЗП засвідчив, що найвпливовішим серед них є експозиція схилу та характеристики стану лісу і лісокористування. Єдиним чинником серед аналізованих, який не виявився дос-

татньо впливовим у жодній із побудованих моделей для його змістовної інтерпретації, виявився ухил поверхні. З'ясовано, що різні класи лісових екосистем, що суттєво відрізняються за ступенем природності, мають різний потенціал надання, а також перелік просторових детермінантів кліматорегулювальних ЕП. Продовження досліджень у цьому напрямку варто виконувати шляхом поєднання мікрокліматичних вимірювань під пологом лісу за різних погодних станів зі збором детальної польової інформації про стан лісового ландшафту.

Результати дослідження, висвітлені у цій публікації, отримані в рамках науково-дослідної теми “Моделювання стратегій менеджменту лісових ландшафтів Карпат за сценаріями зміни клімату” (0120U102200), фінансованої Міністерством освіти і науки України.

Література:

1. Вишневський В., Шевчук С. Використання даних дистанційного зондування Землі для з'ясування термічних особливостей Українських Карпат. Український журнал дистанційного зондування Землі. 2017. № 12. С. 47–52.
2. ВРУ (Верховна Рада України). Закон України “Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року” від 28.02.2019 № 2697-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2019. № 16. ст. 70.
3. ВРУ (Верховна Рада України). Закон України “Про ратифікацію Протоколу про стале управління лісами до Рамкової конвенції про охорону та сталий розвиток Карпат ” від 16.10.2012 р. № 5432-VI. Відомості Верховної Ради. 2013. № 43. ст. 621.
4. Круглов І. Трансдисциплінарна геоecologia: монографія. Львів, 2020. 292 с.
5. Круглов І., Проць Б., Кагало О., Вовк О., Орлов О., Шубер П. Природні та антропогенні чинники оселищного різноманіття Українських Карпат і Закарпатської низовини. У монографії: Каталог типів оселищ Українських Карпат і Закарпатської низовини. Львів, 2012. С. 18-46.
6. Мкртчян О., Шубер П. Геоінформаційне моделювання температурного поля західних регіонів України. Фізична географія і геоморфологія. 2009. Вип. 57. С. 104-112.
7. Мкртчян О., Шубер П. Інтерполяція даних метеоспостережень кількостей опадів та інших кліматичних змінних методом регресійного кригінгу. Вісник Львів. ун-ту. Сер. геогр. 2013. Вип. 42. С. 258-264.
8. Смалійчук А., Гребенер У. (ред.) Природні ліси Українських Карпат. Львів, 2018. 104 с.
9. Шевчук С., Вишневський В. Використання даних супутника Landsat 8 для визначення мікрокліматичних особливостей Києва. Український журнал дистанційного зондування Землі. 2016. № 10. С. 4-9.
10. Common International Classification of Ecosystem Services [Електронний ресурс]. European Environmental Agency, 2021. Режим доступу: <https://cices.eu/resources/>
11. Ermida S.L., Soares P., Mantas V., Göttsche F.-M., Trigo I.F. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. Remote Sens. 2020. Vol. 12, 1471. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12091471>
12. Foley J.A., DeFries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin F.S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K., Helkowski J.H., Holloway T., Howard E.A., Kucharik C.J., Monfreda C., Patz J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Snyder P.K. Global Consequences of Land Use. Science. 2005. № 309 P. 570-574.
13. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science. 2013. Vol. 342 (6130). P. 850–853. doi:10.1126/science.1244693
14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. New York, 2009. 745 p.
15. Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E., Jarvis A. Hole-filled SRTM for the globe Version 4 [Електронний ресурс]. CGIAR-CSI SRTM 90m Database, 2008. Режим доступу: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
16. Kovalchuk I., Mkrтчian O., Kovalchuk A. Modeling the distribution of land surface temperature for Bystrytsia river basin using Landsat 8 data. Journal of Geology Geography and Geocology. 2019. № 27(3). P. 453-465.
17. MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and human well-being: synthesis, 2 edition. Washington, 2005. 160 p.
18. Müller D., Leitão P.J., Sikor T. Comparing the determinants of cropland abandonment in Albania and Romania using boosted regression trees. Agric. Syst. 2013. Vol. 117. P. 66–77.
19. Smaliychuk A., Müller D., Prishchepov A. V., Levers C., Kruhlov I., Kuemmerle T. Recultivation of abandoned agricultural lands in Ukraine: Patterns and drivers. Global Environmental Change. 2016. Vol. 38. P. 70–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.02.009>

20. Thom D., Golivets M., Edling L., Meigs G. W., Gourevitch J. D., Sonter L. J., Galford G. L., Keeton W. S. The climate sensitivity of carbon, timber, and species richness covaries with forest age in boreal–temperate North America. *Global Change Biology*. 2019. Vol. 25, 7. P. 2446-2458.
21. Thom D., Sommerfeld A., Sebald J., Hagge J., Müller J., Seidl R. Effects of disturbance patterns and deadwood on the microclimate in European beech forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020. Vol. 291, 108066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108066>.
22. Wanderley R. L. N., Domingues M. L., Joly A. C., da Rocha R. H. Relationship between land surface temperature and fraction of anthropized area in the Atlantic forest region, Brazil. *PLoS ONE*. 2018. Vol. 14 (12), e0225443. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225443>

References:

1. Vyshnevskiy V., Shevchuk S. Vykorystannya danyh dystancijnogo zonduvannya Zemli dlya zyasuvannya termichnyh osoblyvostej Ukrayinskyh Karpat. *Ukrayinskyj zhurnal dystancijnogo zonduvannya Zemli*. 2017. # 12. S. 47–52.
2. VRU (Verhovna Rada Ukrayiny). Zakon Ukrayiny “Pro osnovni zasady (strategiyu) derzhavnoyi ekologichnoyi polityky Ukrayiny na period do 2030 roku” vid 28.02.2019 # 2697-VIII. Vidomosti Verhovnoyi Rady Ukrayiny. 2019. # 16. st.70.
3. VRU (Verhovna Rada Ukrayiny). Zakon Ukrayiny “Pro raty`fikaciyu Protokolu pro stale upravlinnya lisamy do Ramkovoyi konvenciyi pro oxoronu ta staljy rozvytok Karpat” vid 16.10.2012 r. # 5432-VI. Vidomosti Verhovnoyi Rady. 2013. # 43. st. 621.
4. Kruhlov I. *Transdyscyplinarna geoekologiya: monografiya*. Lviv, 2020. 292 s.
5. Kruhlov I., Prots B., Kagalo O., Vovk O., Orlov O., Shuber P. Pryrodni ta antropogenni chynnyky oselyshchnogo riznomanityta Ukrayinskyh Karpat i Zakarpatskoyi nyzovyny. U monografii: *Katalog typiv oselyshch Ukrayinskyh Karpat i Zakarpatskoyi nyzovyny*. Lviv, 2012. S. 18-46.
6. Mkrtychyan O., Shuber P. Geoinformacijne modelyuvannya temperaturnogo polya zaxidnyh regioniv Ukrayiny. *Fizychna geografiya i geomorfologiya*. 2009. Vyp. 57. S.104-112.
7. Mkrtychyan O., Shuber P. Interpolyciya danyh meteostoperezhen kilkostej opadiv ta inshyx klimatychnyh zminnyh metodom regresijnogo krygingu. *Visnyk Lviv. un-tu. Ser. geogr.* 2013. Vyp. 42. S. 258-264.
8. Smaliychuk A., Grebener U. (ed.) *Natural forests of Ukrainian Carpathians*. Lviv, 2018. 104 s.
9. Shevchuk S., Vyshnevskiy V. Vykorystannya danyh suputnyka Landsat 8 dlya vyznachennya mikroklimatychnyh osoblyvostej Kyueva. *Ukrayinskyj zhurnal dystancijnogo zonduvannya Zemli*. 2016. # 10. S. 4-9.
10. Common International Classification of Ecosystem Services [Електронний ресурс]. European Environmental Agency, 2021. Режим доступу: <https://cices.eu/resources/>
11. Ermida S.L., Soares P., Mantas V., Göttsche F.-M., Trigo I.F. Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series. *Remote Sens*. 2020. Vol. 12, 1471. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12091471>
12. Foley J.A., DeFries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin F.S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K., Helkowski J.H., Holloway T., Howard E.A., Kucharik C.J., Monfreda C., Patz J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Snyder P.K. Global Consequences of Land Use. *Science*. 2005. № 309 P. 570-574.
13. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 2013. Vol. 342 (6130). P. 850–853. doi:10.1126/science.1244693
14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. New York, 2009. 745 p.
15. Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E., Jarvis A. Hole-filled SRTM for the globe Version 4 [Електронний ресурс]. CGIAR-CSI SRTM 90m Database, 2008. Режим доступу: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
16. Kovalchuk I., Mkrtychyan O., Kovalchuk A. Modeling the distribution of land surface temperature for Bystrytsia river basin using Landsat 8 data. *Journal of Geology Geography and Geoecology*. 2019. № 27(3). P. 453-465.
17. MEA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and human well-being: synthesis*, 2 edition. Washington, 2005. 160 p.
18. Müller D., Leitão P.J., Sikor T. Comparing the determinants of cropland abandonment in Albania and Romania using boosted regression trees. *Agric. Syst*. 2013. Vol. 117. P. 66–77.
19. Smaliychuk A., Müller D., Prishchepov A. V., Levers C., Kruhlov I., Kuemmerle T. Recultivation of abandoned agricultural lands in Ukraine: Patterns and drivers. *Global Environmental Change*. 2016. Vol. 38. P. 70–81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.02.009>
20. Thom D., Golivets M., Edling L., Meigs G. W., Gourevitch J. D., Sonter L. J., Galford G. L., Keeton W. S. The climate sensitivity of carbon, timber, and species richness covaries with forest age in boreal–temperate North America. *Global Change Biology*. 2019. Vol. 25, 7. P. 2446-2458.
21. Thom D., Sommerfeld A., Sebald J., Hagge J., Müller J., Seidl R. Effects of disturbance patterns and deadwood on the microclimate in European beech forests. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020. Vol. 291, 108066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108066>.
22. Wanderley R. L. N., Domingues M. L., Joly A. C., da Rocha R. H. Relationship between land surface temperature and fraction of anthropized area in the Atlantic forest region, Brazil. *PLoS ONE*. 2018. Vol. 14 (12), e0225443. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225443>

Аннотация:

А.Д. Смалійчук, И.С. Круглов, О.Г. Часковский, А.В. Смалійчук, В.И. Биланюк.

КЛИМАТОРЕГУЛИРУЮЩИЕ ЭКОСИСТЕМНЫЕ УСЛУГИ ЛЕСНОГО ЛАНДШАФТА УКРАИНСКИХ КАРПАТ

В статье представлены результаты исследования, направленного на изучение связи между регулируемыми климат экосистемными услугами и их структурно-экологическими детерминантами в лесном ландшафте в Украинских Карпатах на примере горных лесных экосистем Раховского и Тячевского районов Закарпатской области. Для этого исследования мы использовали информацию о температуре земной

поверхности (ТЗП), полученную из Landsat 8 за летний сезон 2015 года. Данные ТЗП подверглись нормализации и в дальнейшем анализе использовали нормализованную ТЗП (нТЗП). Набор независимых переменных включал геоморфометрические показатели и данные о лесном покрове. В целом, все лесные экосистемы в нашем исследовании были разделены на три отдельных класса - «естественные», «нарушенные» и «прочие» леса. Используя метод усиленных регрессионных деревьев, мы построили три статистические модели для каждого из классов леса, названных «глобальными» моделями. Также мы разработали 12 «локальных» моделей, которые показали связь между нТЗП и проанализировали независимые переменные в каждой высотной биоклиматической зоне. Эффективность статистической модели, основанная на показателе объясненной дисперсии, колебалась от 32 до 74%. Набор влияющих переменных для разных классов лесов существенно различается, но чаще всего они включают соляную экспозицию, плотность древостоя и альтитуду, несмотря на применявшуюся ранее нормализацию. Можно сделать вывод, что в зависимости от состояния естественности лесных экосистем они обладают разным климаторегулирующим потенциалом, который может быть сильно истощен в результате антропогенных и природных нарушений.

Ключевые слова: лесной ландшафт, экосистемные услуги, геотеледетекция, космоизображение Landsat, изменение климата, климаторегулирование, Украинские Карпаты.

Abstract:

Smaliychuk A.D., Kruhlov I.S., Chaskovskyi O.G., Smaliychuk G.V., Bilanyuk V.I. CLIMATE REGULATING ECOSYSTEM SERVICES OF THE FOREST LANDSCAPE IN THE UKRAINIAN CARPATHIANS

Ecosystems provide multiple services for humans. Among them, a group of supporting and regulating ecosystem services is often less recognized by people as benefit and has been less studied by researchers. Amid various manifestations of climate change, more attention has been paid to particular subset of this group of services called climate regulating. Despite these there still few quantitative studies in this field. Trying to fill this research gap we conducted a study aimed at exploration of relation between climate regulating ecosystem services and their spatial determinants in the forest landscape within Ukrainian Carpathians. For that we chose the territory within Rakhiv and Tsiachiv districts in Transcarpathian region which represents all diversity of forest mountain ecosystems. For this study we used information on land surface temperature (LST) extracted from Landsat 8 thermal band for summer season of 2015. In order to account for vertical thermal gradient in mountains the LST data underwent normalization and in further analysis a dependent variable we employed normalized LST (nLST). Set of independent variables included geomorphometric indicators (altitude, slope, aspect, TPI) and data on forest cover (disturbance, density, dominant species, and disturbance in the neighborhood). For key study area of Velykyi watershed of 4059 ha we additionally used data on forest biomass and tree age. In general, all forest ecosystems in present research have been divided into three distinct classes – “natural”, “disturbed” and “other” forests. Using boosted regression trees method we built three statistical models for each of the forest classes called “global” models. Also we developed 12 “local” models that showed the link between nLST and analyzed independent variables within each altitudinal bioclimatic zone with considering also forest class. Three separate statistical models have been built for each of the forest classes for key study area. Our results suggest that both maximum and mean values of nLST within particular altitudinal bioclimatic zone are the lowest in “natural” forests and the highest in “disturbed” ones.. The statistical model performance based on the variance explained indicator ranged from 32 to 74 %, whilst for models for key study area it was between 77 and 89 %. The set of influential variables for different forest classes varied substantially, but the most often they included aspect, forest density and elevation despite of normalization applied before. In models created for class “disturbed” forests between 19 and 35 % of all explained variance has been contributed by variable indicating time of disturbance. In “local” models for class “natural” forests we revealed gradual decrease of influence of the geomorphometric indicators (elevation, slope, and TPI) when move from warmer to cooler altitudinal zones while for topographic aspect and forest density the trends were just the opposite. In case of key study area a wood stock and tree age variables along with elevation and aspect were amongst the most influential ones. We can conclude that depending on the state of naturalness of forest ecosystems they have different climate regulating potential which might be severely depleted by human and natural disturbances.

Keywords: forest landscape, ecosystem services, remote sensing, climate regulation, climate change, Landsat satellite images, Ukrainian Carpathians.

Надійшла 05.11.2021 р.