

УДК 551.586:551.584:551.582:574.45

МОДЕЛЮВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ ЧИННИКІВ ВИСОТНОЇ ПОЯСНОСТІ РОСЛИННОСТІ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ ТА ЇЇ ЗМІН УНАСЛІДОК ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ

Олександр Мкртчян 

*Львівський національний університет імені Івана Франка,
вул. П. Дорошенка, 41, 79007, м. Львів, Україна,
e-mail: alemkrt@gmail.com*

Очікувані у поточному столітті кліматичні зміни зумовлять суттєві зміщення меж потенційних ареалів поширення видів, їхніх угруповань, екосистем, та зміни їхніх площ. В представленій роботі наведено дослідження кліматичних чинників, які впливають на формування висотної поясності рослинності в Українських Карпатах. Оскільки межі висотних поясів на даній території суттєво видозмінені антропогенною діяльністю, для виявлення положення природних меж поясів було розроблено метод, який полягає у статистичному аналізі розподілу висотного градієнта визначених за знімком Landsat 8 значень індексу NDVI. Далі, використовуючи моделі множинної регресії, проаналізовано зв'язок між положенням природних меж рослинних поясів та біокліматичними параметрами, що містяться у датасеті WorldClim.

Таким чином було визначено, що на положення межі неморального та бореального поясів у цьому гірському регіоні більше впливають мінімальні зимові температури, тоді як положення межі бореального та високогірного поясів головно визначене середньою температурою найтеплішого кварталу року. На основі кліматичних даних закартоване положення висотних поясів рослинності, що відображають природно-кліматичний аспект умов місцезростання – потенційну рослинність на класифікаційному рівні біому та типу рослинності.

Датасет WorldClim, окрім актуальних кліматичних даних, містить прогнози кліматичні поверхні, отримані моделюванням глобальної кліматичної системи. Використання цих даних дало змогу спрогнозувати зміни в місцеположенні та відносних площах висотних поясів Карпат під впливом глобального потепління. У середині XXI ст. треба очікувати суттєвого розширення площі неморального поясу і значного зменшення площ бореального та високогірного поясів, які можуть цілком зникнути в цьому регіоні до 2070 р.

Ключові слова: Карпати, висотна поясність, глобальне потепління, Landsat, WorldClim.

Антропогенно зумовлені глобальні кліматичні зміни – у край актуальна проблема, яка є у фокусі уваги різноманітних міжнародних організацій, національних урядів, усесвітніх політичних форумів, громадських природоохоронних організацій. У світовій науці існує консенсус щодо факту антропогенно зумовленого глобального потепління, проте його часова динаміка, регіональна мінливість у темпах зміни температури та інших кліматичних параметрів, характер впливу цих змін на властивості гідросфери, педосфери, біосфери й інших складових географічної оболонки наразі недостатньо вивчені.

Основним джерелом науково вірогідної інформації щодо фізичних процесів, рушійних чинників і механізмів глобальних кліматичних змін, їхніх гаданих впливів на водні та геохімічні цикли, характеристики екосистем, частоту й інтенсивність проявів екстремальних метеорологічних та гідрологічних явищ і процесів, найбільш ефективних заходів щодо пом'якшення кліматичних змін та адаптації до них є регулярні доповіді Міжурядової групи експертів з питань змін клімату (МГЕЗК) – організації, заснованої 1988 р. Всесвітньою метеорологічною організацією (ВМО) та Програмою ООН з навколишнього середовища (ЮНЕП). Фахівці цієї організації роблять висновки на підставі аналізу інформації з опублікованих наукових праць, а також звітів державних агенцій та неурядових організацій. Наразі опубліковано п'ять доповідей, з яких кожна наступна спирається на новіші та щоразу достовірніші дані. П'ята доповідь МГЕЗК вийшла 2014 р. та є у вільному доступі на сайті цієї організації [6]. Темпи та наслідки антропогенних кліматичних змін змодельовано для чотирьох різних сценаріїв, які передбачають різну динаміку та рівні викидів упродовж поточного століття [6]. У цьому випадку врахована інерційність, притаманна процесам в атмосфері та Світовому океані, з огляду на яку навіть у разі припинення чи радикального зменшення викидів парникових газів їхній вплив на клімат зберігатиметься впродовж багатьох десятиліть. Зокрема, визначено, що середня глобальна приземна температура до 2100 р. орієнтовно підвищиться від 1 °C (найбільш оптимістичний сценарій rcp2.6) до 3,7 °C (найбільш песимістичний сценарій rcp8.5) [6].

Зазначені кліматичні зміни будуть суттєво диференційовані за регіонами. Ми [1] на підставі аналізу попередньої доповіді МГЕЗК та динаміки кліматичних параметрів, виміряних на метеостанціях заходу України впродовж останнього століття, окреслили ймовірні майбутні зміни температурного режиму в західних регіонах України внаслідок впливу глобального потепління. Очікувані суттєві кліматичні зміни неодмінно позначатимуться на екологічних умовах стосовно рослинних і тваринних видів, на динаміці та функціонуванні природних екосистем. Зокрема, відбудуться суттєві зміщення меж потенційних ареалів поширення видів та зміни їхніх площ.

Українські Карпати, займаючи площу близько 21 тис. км², є важливим осередком біологічного та ландшафтного різноманіття України, містять біотопи цінних та рідкісних рослинних і тваринних видів, мають великий туристично-рекреаційний потенціал, регулюють водний режим річок південного заходу України. Важливою також є їхня роль як біокоридора для міграції тварин у межах великої Карпатської дуги, між її західною та південно-східною частинами [10]. Відповідно, інформація щодо впливу очікуваних кліматичних змін на екологічні умови та просторовий розподіл природних екосистем Українських Карпат є дуже актуальною з погляду раціональної організації природоохоронної діяльності, планування лісогосподарських заходів. Адже за період, необхідний для зростання та досягання деревостану (декілька десятиліть), кліматичні умови можуть значно змінитись, і заходи, що спираються на врахування поточних еколого-кліматичних умов, не завжди будуть однаково ефективними за умов, що змінились.

Розподіл екосистем в Українських Карпатах, як і в інших гірських системах, значно регульований явищем висотної поясності, яке зумовлює існування системи висотних біокліматичних поясів (смуг). Їхні межі загалом відповідають певним гіпсометричних рівням, проте значення висот, що відповідають цим рівням, можуть бути дещо різними в різних частинах гірської системи та на схилах різних макроекспозицій (на південних схилах, зазвичай, розташовані вище, ніж на північних). Попри загальну тенденцію до зменшення теплозабезпеченості з висотою, в умовах складного гірського рельєфу набувають

значення чинники локального характеру: формування температурних інверсій у вузьких долинах та улоговинах (що призводять до зменшення або й зміни знака вертикального градієнта окремих кліматичних параметрів), неоднакове нагрівання схилів різних експозицій тощо. Зрештою, розподіл гірських екосистем визначений не лише кліматичним, а й гідрологічним та едафічним чинниками: розподілом вологи та властивостями ґрунтів, пов'язаними з локальним рельєфом і геологічною будовою. В умовах кліматичних змін ці чинники можна вважати константними.

Проте диференціацію умов теплозабезпеченості вважають головним чинником, що визначає розподіл у гірських умовах найширших категорій екосистем – біомів, яким відповідають гірські рослинні пояси. Для кількісної характеристики цих умов у прив'язці до розподілу типів рослинності використовують низку біокліматичних параметрів та індексів [5]. Традиційно в пострадянських країнах найпоширенішим з таких індексів є сума активних температур – вище 5 °C або вище 10 °C. Суми активних (понад 10 °C) температур є в основі виділення М. Андріановим термічних зон у Карпатах [3]. На рис. 1 показане приблизне співвідношення між зазначеними термічними зонами та рослинними поясами Українських Карпат. Деяко відмінний поділ наведено в праці [4]: там в Українських Карпатах виділено сім біокліматичних поясів – поміж дубовим і буковим та буковим і ялиновим виділені два “проміжні” пояси.

Кліматична зона	Сума активних температур, °C	Висотний пояс рослинності
Холодна	<1000	Альпійський
Помірно холодна	1000–1400	Субальпійський
Прохолодна	1400–1800	Ялинових лісів
Помірна	1800–2400	Букових лісів
Тепла	2400–2600	
Дуже тепла	2600–3000	Передгірських дубових лісів

Рис. 1. Співвідношення між термічними зонами Українських Карпат (за М. Андріановим [3]) та висотними поясами рослинності (за М. Голубцем та К. Малиновським [3])
 Fig. 1. Relationship between the Ukrainian Carpathians temperature zones (by M. Andrianov [3]) and altitudinal vegetation belts (by M. Golubets and K. Malynovskiy [3])

Серед праць, у яких кількісно проаналізовано ймовірний вплив майбутніх кліматичних змін на висотну поясність гірської рослинності, виділимо працю [5]. Дослідження чутливості гірських екосистем Швейцарії до кліматичних змін виявило на високу ймовірність суттєвих змін у розподілі екотопів та екосистем унаслідок прогнозованих кліматичних змін [5]. Наприклад, на значних площах півночі Швейцарії букові формації в другій половині XXI ст. зміняться формаціями з домінуванням грабу *Carpinion betuli*, а на південному сході на місці теперішніх грабових лісів переважатимуть ліси з дубу пухнастого та скельного (формація *Quercion pubescenti-petraeae*) [5].

У праці [10] з використанням стохастичної процесної моделі LANDIS-II спрогнозовано динаміку лісових біоценозів у межах Рахівського р-ну Закарпатської обл., з урахуванням

процесів репродукції, конкуренції між видами тощо, а також локальних екологічних умов. Окремі розширення моделі додатково аналізували ефекти вітровалів та спалахів поширення шкідників (короїдів). Обчислення виконано для чотирьох стандартних сценаріїв динаміки концентрації парникових газів [6], які передбачають підвищення середньої глобальної температури повітря з 1,5 °C до 4,5 °C. Моделювання охоплювало період 500 років (що дало змогу повною мірою врахувати інерційність реакції екосистем); уважали, що кліматичні зміни триватимуть до кінця XXI ст., після чого кліматичні умови будуть сталими. Результати засвідчили суттєве зростання площі формацій граба *Carpinion betuli* та зменшення площі формацій з домінуванням хвойних лісів, насамперед *Abies Alba*. Площа букових формацій зміниться незначно, проте ареал їхнього поширення переміститься на вищі гіпсометричні рівні [10].

Серед меж висотних поясів особливе значення мають ті, що позначають зміну типів рослинності та екосистем. В Українських Карпатах це відбувається на верхній межі лісу, яка позначає перехід від лісових екосистем до трав'янистих та чагарникових субальпійського поясу. В умовах високого антропогенного пресингу місцезонального реальної верхньої межі лісів в Українських Карпатах переважно є штучним, зумовленим довготривалими практиками вирубок лісів та випасання худоби. Однак зіставлення даних космознімків Landsat ETM за 2000–2002 рр. та історичних карт станом на 1930-ті роки виявило помітне підняття верхньої межі лісу в Українських Карпатах [11]. Найбільшим воно виявилось у підвищених та віддалених масивах Горганів, Чорногори та Мармароша, що дає підстави пов'язати його зі змінами природно-кліматичних умов. У дослідженні [12] зроблений прогноз зміни положення верхньої межі лісу в Українських Карпатах станом на 2050 і 2070 р. для різних сценаріїв динаміки концентрації парникових газів і різних кліматичних моделей. На підставі класифікації космознімка Landsat 5 TM ідентифіковано найімовірніші локації верхньої межі лісу, які зіставлено зі значеннями біокліматичних змінних, отриманими з датасету WorldClim [8]. Найбільш статистично значимою з цих змінних виявилась середня температура найтеплішого кварталу року. Зіставлення обчислених порогових для верхньої межі лісу значень цієї змінної з її прогнозованим розподілом станом на 2050 і 2070 р. (отриманий з цього ж датасету) засвідчило радикальне скорочення і ймовірне зникнення субальпійських та альпійських біотопів в Українських Карпатах до середини XXI ст. навіть за оптимального сценарію динаміки парникових газів.

Це дослідження є певною мірою розвитком попереднього. Наша мета – комплексне дослідження та прогнозування ймовірної динаміки висотної поясності біотопів Українських Карпат під дією глобального потепління. Джерелом кліматичних даних, як і в попередньому дослідженні, слугував датасет WorldClim [8] – глобальні растрові поверхні низки кліматичних параметрів та біокліматичних змінних з просторовою роздільністю 1 км. Крім поверхонь, які описують клімат станом на другу половину XX ст. (створені на підставі усереднення даних метеостанцій за період 1960–1990-х років), датасет містить історико-кліматичні дані, а також прогнозну інформацію, тобто кліматичні поверхні, обчислені станом на 2050 та 2070 р. на підставі різних кліматичних моделей та з огляду на різні сценарії динаміки концентрації парникових газів.

На рис. 2 показано територію досліджень: калібрування моделі виконано на підставі даних для частини території Українських Карпат, яку можна вважати репрезентативною стосовно структури висотної поясності, після чого цю модель використовували для обчислення кількісних співвідношень для всієї території Українських Карпат.

Місцезоналення висотних поясів рослинності та їхніх меж визначали на підставі аналізу розподілу індексу NDVI, обчисленого за космознімком Landsat 8, отриманим 10 серпня 2016 р. (див. рис. 3). Нормалізований вегетаційний індекс (NDVI) обчислено за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

де NIR – відбивна здатність у ближньому інфрачервоному діапазоні; RED – відбивна здатність у червоному діапазоні спектра (відповідають каналам 5 та 4 мультіканального знімка Landsat 8) [13]. Цей індекс, серед іншого, характеризує інтенсивність фотосинтезу, біологічну продуктивність екосистем, ступінь розвинутості й стан наземної фітомаси [2].

Для простоти висотні пояси, які традиційно виділяють у межах Українських Карпат (див. рис. 1), зібрано у три групи: неморальна (пояси широколистяних лісів, охоплює дубовий та буковий), бореальна (охоплює пояс ялинових/смерекових лісів) та високогірна (охоплює субальпійський та альпійський пояси). Для локалізації положення цих поясів та їхніх меж використано підхід на підставі оверлейного аналізу растрового шару значень індексу NDVI та шарів похилів і експозиції поверхні, отриманих з цифрової моделі рельєфу (використовували модель SRTM [9], див. рис. 2).

В основі цього припущення є уявлення про межу поясів як про порівняно вузьку смугу, перпендикулярну до градієнта перевищень. У нашому дослідженні [2] з'ясовано, що значення індексу NDVI мають тенденцію до зменшення з висотою. Це, насамперед, пов'язане з висотною поясністю рослинності: високогірні субальпійські й альпійські угруповання мають найменші його значення, тоді як угруповання листяних лісів – найбільші. Отже, на межі поясів простежується суттєве зменшення значення NDVI у напрямі градієнта висоти поверхні. З огляду на це, для визначення ймовірного місцезоналення цієї межі можна обчислити скалярний добуток векторів падіння поверхні (функціями *slope* та *aspect*, застосованими до растра висот) та вектора зміни значень NDVI (отримуються тими ж функціями) (див. рис. 4).

Наступним етапом дослідження був вибір біокліматичних параметрів, які описують вигоди зональних угруповань стосовно клімату [5], та статистичний аналіз їхнього зв'язку з положенням біокліматичних поясів і їхніх меж. Датасет Worldclim містить дані щодо розподілу 19 таких параметрів, пов'язаних із забезпеченістю ресурсами тепла та атмосферної вологи. З них обрано такі, що характеризують умови теплозабезпеченості, за винятком тих, що в умовах цієї території дублюють інші показники, та тих, що є їхніми комбінаціями. Загалом це шість параметрів: BIO1 – середньорічна температура, BIO2 – середньодобова амплітуда температури, BIO4 – річна варіабельність середньодобових температур; BIO5 – максимальна температура найтеплішого місяця (липня); BIO6 – мінімальна температура найхолоднішого місяця (січня); BIO10 – середня температура найтеплішого кварталу року; BIO11 – середня температура найхолоднішого кварталу року.

З використанням моделі множинної регресії проаналізовано зв'язок між цими показниками та ймовірними локаціями меж рослинних поясів, визначеними за наведеним вище методом (окремо – для межі неморальної і бореальної груп поясів та межі бореальної і високогірної груп поясів), основні показники якого є в табл. 1 та 2.

На підставі результатів регресійного аналізу визначено, що для межі бореальної і неморальної груп висотних поясів найбільш значимою змінною є BIO6 (див. табл. 1), тоді як для межі бореальної та високогірної груп поясів – BIO10 (див. табл. 2).

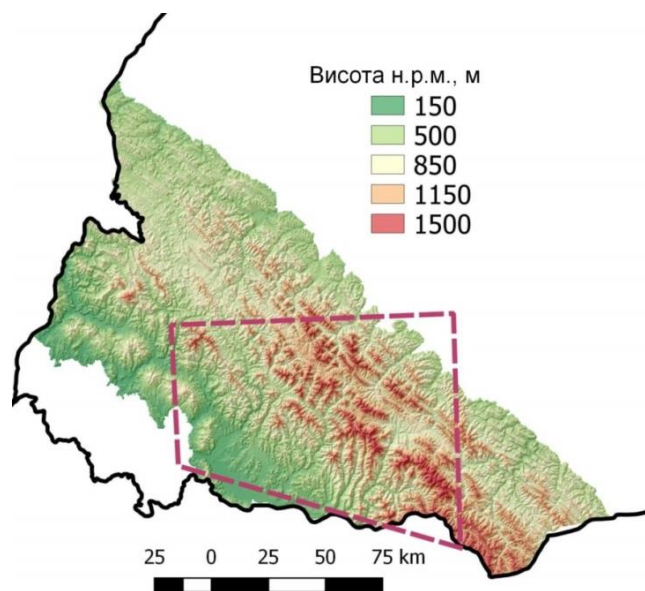


Рис. 2. Територія дослідження (Українські Карпати);
штрихом показано частину, для якої виконували калібрування моделі
Fig. 2. Study area (Ukrainian Carpathians);
dotted line shows the part, which the model has been calibrated on

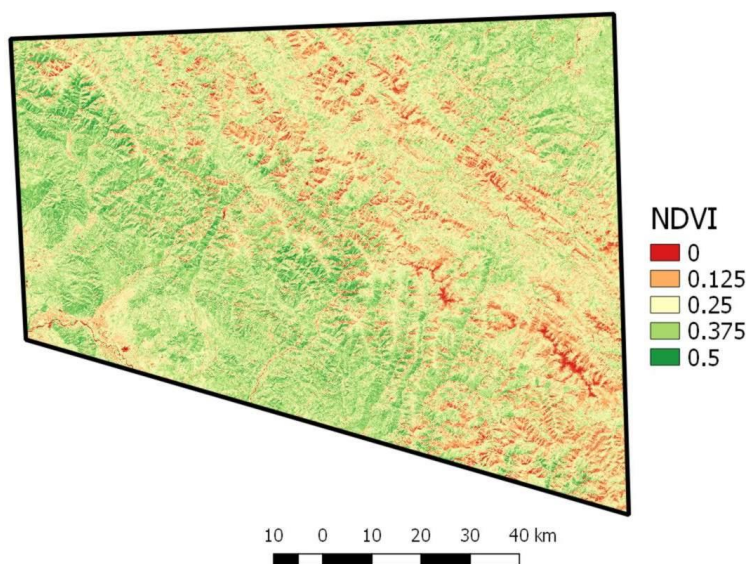


Рис. 3. Розподіл значень індексу NDVI в центральній частині Українських Карпат
станом на 10 серпня 2016 р.
Fig. 3. Distribution of NDVI index values in the central part of Ukrainian Carpathians,
by August 10, 2016

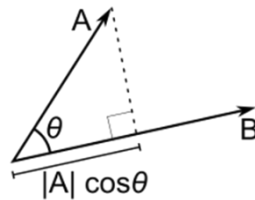


Рис. 4. Скалярний добуток вектора падіння поверхні та вектора зміни значень NDVI дозволяє визначити локації, в яких ці вектори змінюються синхронно, а отже – має місце суттєве зменшення значень NDVI з висотою
 Fig. 4. Dot product of the surface drop vector and the vector of NDVI values change

Таблиця 1

Зв'язок між біокліматичними змінними та положенням межі неморальної і бореальної груп висотних поясів
 Relationship between bioclimatic variables and the location of the border between nemoral and boreal groups of altitudinal belts

Біокліматична змінна	t-значення	Залишкова стандартна похибка
Bio 1	7,284	9.013e-05
Bio 2	12,53	9.012e-05
Bio 4	7,454	9.01e-05
Bio 5	5,776	9.013e-05
Bio 6	14,09	6.187e-09
Bio 10	5,354	2.313e-09
Bio 11	10,12	4.820e-09

Таблиця 2

Зв'язок між біокліматичними змінними та положенням межі бореальної і високогірної груп висотних поясів
 Relationship between bioclimatic variables and the location of the border between boreal and alpine groups of altitudinal belts

Біокліматична змінна	t-значення	Залишкова стандартна похибка
Bio 1	30.24	2.893e-08
Bio 2	6.069	6.243e-08
Bio 4	24.29	3.315e-11
Bio 5	30.95	4.124e-09
Bio 6	30.54	1.412e-08
Bio 10	31.65	5.471e-09
Bio 11	30.90	1.148e-08

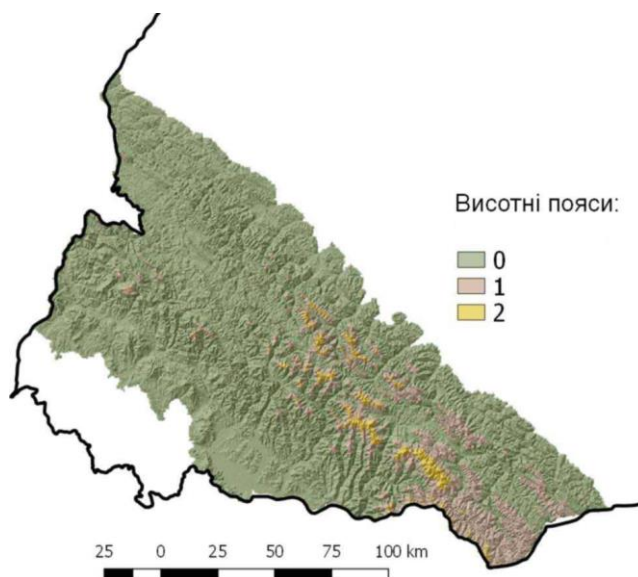


Рис. 5. Сучасний розподіл груп висотних поясів.
Групи: 0 – неморальна, 1 – бореальна, 2 – високогірна
Fig. 5. Modern distribution of groups of altitudinal belts.
Groups: 0 – nemoral, 1 – boreal, 2 – alpine



Рис. 6. Прогнозований розподіл груп висотних поясів для 2050 р.
(модель CCSM, сценарій rcp26). Групи: 0 – неморальна, 1 – бореальна, 2 – високогірна
Fig. 6. Prospective distribution of groups of altitudinal belts for 2050
(model CCSM, scenario rcp26). Groups: 0 – nemoral, 1 – boreal, 2 – alpine

На рис. 5 показано розподіл висотних поясів в Українських Карпатах, обчислений за описаною методикою. Зазначимо, що показані пояси відображають не актуальний стан рослинності, а кліматичний аспект умов місцезростання – ту природну клімаксову рослинність, яка б розвилась у випадку стабільного збереження цих кліматичних умов протягом тривалого часу. Ідеться фактично про картування потенційної рослинності [15] на найвищому класифікаційному рівні – біому та типу рослинності.

Окремо змодельовано прогнозний розподіл груп висотних поясів з огляду на прогнозовану динаміку кліматичних змін, спричинених техногенним збільшенням концентрації парникових газів. За основу взято результати застосування моделі кліматичної системи CCSM [14] для сценаріїв динаміки концентрації парникових газів rcp26 та rcp45 станом на 2050 та 2075 рр. Результат для найбільш “оптимістичного” сценарію rcp26 відображений на рис. 6. Як бачимо, площі неморальної групи суттєво зросли, тоді як бореальна та високогірна групи збереглись лише у верхніх частинах найбільш підвищених гірських масивів.

Повніше уявлення про ймовірне майбутнє співвідношення груп висотних поясів дає таблиця їхніх площ (табл. 3). Бачимо суттєве (на порядки) прогнозоване зменшення площ бореальної та високогірної груп та повне їхнє зникнення в Українських Карпатах до 2070 р. у разі реалізації сценарію rcp45.

Отже, описаний метод, у якому використано відкриті дані дистанційного зондування землі та кліматичні поверхні, дає змогу визначити та закартувати розподіл висотних рослинних поясів і потенційних типів рослинності в межах гірського регіону. Цей тип моделювання відповідає моделям стаціонарного стану, тобто характеризує клімаксову природну рослинність, що перебуває в рівновазі з кліматичними умовами (кліматопом), абстрагуючись від її динамічних рис та антропогенних порушень. Узяті за основу кліматичні поверхні є достатньо грубими і не враховують локальних ефектів, пов’язаних з відмінностями місцевих експозицій, формуванням температурних інверсій у зниженнях рельєфу тощо. Додаткове врахування таких ефектів і чинників дасть змогу збільшити точність моделювання.

Таблиця 3

Відносні площі груп висотних поясів станом на різний час
та за різних сценаріїв динаміки кількості парникових газів, км²
Relative areas of groups of altitudinal belts for different times
and different scenarios of greenhouse gases dynamics, km²

Модель:сценарій:рік	Група висотних поясів		
	Неморальна	Бореальна	Високогірна
Теперішній час	17873	2715	426
CCSM4:rcp26:2050	20951	55	8
CCSM4:rcp45:2050	20990	22	2
CCSM4:rcp26:2070	20993	19	2
CCSM4:rcp45:2070	21014	–	–

Використаний підхід не враховує вертикальної диференціації кількостей опадів, які в умовах помірного поясу мають виразну тенденцію до зростання з висотою, у цьому разі паралельно змінюються біокліматичні індекси, які характеризують забезпеченість екосистем атмосферною вологою. Деякі дослідники екосистем Альп стверджують, що в умовах достатньої та надмірної кількості атмосферних опадів саме температурний режим відіграє

визначальну роль у вертикальній диференціації зональної рослинності [5]. Припускаємо, що це твердження правильне і щодо Карпат. Це суттєво спрощує прогнозування динаміки екотопів та екосистем, адже передбачення майбутніх змін у кількостях опадів є значно менш вірогідним, ніж передбачення щодо підвищення температур [6]. Наприклад прогнозовані зміни в річних кількостях опадів на період 2081–2100 рр. на підставі усереднення результатів низки моделей для південно-західної частини України є меншими, ніж одне стандартне відхилення від природної міжрічної варіабельності [6].

Результати моделювання свідчать, що потепління клімату вже в середині XXI ст. призведе до майже цілковитого зникнення в Українських Карпатах кліматопів бореальних (смерекових) лісів та субальпійських і альпійських угруповань. Ці угруповання в стабільному природному клімаксовому стані мають шанс зберегтись лише в окремих рефугіумах у верхніх частинах найбільш підвищених масивів Українських Карпат, які потребуватимуть особливої природоохоронної уваги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Мкртчян О. С.* Глобальне потепління та його вплив на термічний режим Західної України // Вісник Львів. ун-ту. Сер. геогр. 2010. Вип. 38. С. 206–214. doi:10.30970/vgg.2010.38.2271
2. *Мкртчян О. С.* Цифровий аналіз мультиспектрального космознімка Landsat 7 ETM+ ділянки центральної частини Українських Карпат // Вісник Львів. ун-ту. Сер. геогр. 2013. Вип. 41. С. 205–212. doi:10.30970/vgg.2013.41.1994
3. *Природа Українських Карпат / За ред. К. І. Геренчука.* Львів: Вид-во Льв. ун-ту, 1968. 266 с.
4. *Проць Б., Кагало О.* Каталог типів оселищ Українських Карпат і Закарпатської низовини. Львів: Меркатор, 2012. 294 с.
5. *Brzeziecki B., Kienast F., Wildi O.* Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland // Journal of Vegetation Science. 1995. Vol. 6. P. 257–268. doi:10.2307/3236221
6. *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. 151 pp.
7. *Deodatus F., Kruhlov I., Protsenko P. et al.* Creation of Ecological Corridors in the Ukrainian Carpathians. In: J. Kozak et al. (Eds.). The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability. Environmental Science and Engineering. Springer, 2013. P. 701–717. doi:10.1007/978-3-642-12725-0_49
8. *Hijmans R. J., Cameron S. E., Parra J. L., Jones P. G., Jarvis A.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2005. Vol. 25. P. 1965–1978. doi:10.1002/joc.1276
9. *Jarvis A., Reuter H. I., Nelson A., Guevara E.* Hole-filled seamless SRTM data V4 // International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). 2008. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org>
10. *Kruhlov I., Thom D., Chaskovsky O., Keeton W. S., Scheller R. M.* Future forest landscapes of the Carpathians: vegetation and carbon dynamics under climate change // Reg Environ Change. 2018. Vol. 18. P. 1555–1567. doi:10.1007/s10113-018-1296-8
11. *Martazinova V., Ivanova O., Shandra O.* Climate and treeline dynamics in the Ukrainian Carpathians Mts // Folia Oecologica. 2011. Vol. 38. P. 66–72.

12. Mkrтчian A., Svidzinska D. Modeling the location of natural cold-limited treeline and alpine meadow habitats in Ukrainian Carpathians. In: Forum Carpathicum 2014: Local Responses to Global Challenges. Conference abstracts. Lviv, Ukraine, 2014. P. 102–103.
13. Rouse J. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering // Third ERTS Symposium. NASA SP-351(I). 1973. P. 309–317.
14. Shields C. A., Bailey D. A., Danabasoglu G., Jochum M., Kiehl J. T., Levis S., Park S. The Low-Resolution CCSM4. // Journal of Climate. 2012. Vol. 25(12). P. 3993–4014. doi:10.1175/jcli-d-11-00260.1
15. Tüxen R. Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung // Angew. Pflanzensoziol. (Stolzenau). 1956. Vol. 13. P. 5–42.

REFERENCES

1. Mkrтчian, O. (2010). Global warming and its influence on the thermic regime of Western Ukraine. *Visnyk of the Lviv University. Series Geography*, 38, 206–213. doi:10.30970/vgg.2010.38.2271 (in Ukrainian).
2. Mkrтчian, O. (2013). Digital analysis of multispectral space imagery Landsat 7 ETM+ of the area in central part of Ukrainian Carpathians. *Visnyk of the Lviv University. Series Geography*, 41, 205–212. doi:10.30970/vgg.2013.41.1994 (in Ukrainian).
3. Herenchuk, K. I. (Ed.) (1968). *The nature of Ukrainian Carpathians*. Lviv: Lviv University, 266 pp. (in Ukrainian).
4. Prots, B., & Kahalo, O. (2012). *Catalogue of Ukrainian Carpathians and Transcarpathian lowland habitat types*, Lviv: Merkator, 294 pp. (in Ukrainian).
5. Brzeziecki, B., Kienast, F., & Wildi, O. (1995). Modelling potential impacts of climate change on the spatial distribution of zonal forest communities in Switzerland. *Journal of Vegetation Science*, 6(2), 257–268. doi:10.2307/3236221
6. *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.)] (2014). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
7. Deodatus, F., Kruhlov, I., Protsenko, L., Bashta, A.-T., Korzhyk, V., Tatu, S., ... Perzanowski, K. (2013). Creation of Ecological Corridors in the Ukrainian Carpathians. *Environmental Science and Engineering*, 701–717. doi:10.1007/978-3-642-12725-0_49
8. Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965–1978. doi:10.1002/joc.1276
9. Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). *Hole-filled seamless SRTM data V4*. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). URL: <http://srtm.csi.cgiar.org>
10. Kruhlov, I., Thom, D., Chaskovskyy, O., Keeton, W. S., & Scheller, R. M. (2018). Future forest landscapes of the Carpathians: vegetation and carbon dynamics under climate change. *Regional Environmental Change*, 18(5), 1555–1567. doi:10.1007/s10113-018-1296-8
11. Martazinova, V., Ivanova, O., & Shandra, O. (2011). Climate and treeline dynamics in the Ukrainian Carpathians Mts. *Folia Oecologica*, 38, 66–72.
12. Mkrтчian, A., & Svidzinska, D. (2014). Modeling the location of natural cold-limited treeline and alpine meadow habitats in Ukrainian Carpathians. In: *Forum Carpathicum 2014: Local Responses to Global Challenges. Conference abstracts*. (pp. 102–103). Lviv, Ukraine.

13. Rouse, J. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering (Eds.), *Third ERTS Symposium* (pp. 309–317). NASA SP-351(I).
14. Shields, C. A., Bailey, D. A., Danabasoglu, G., Jochum, M., Kiehl, J. T., Levis, S., & Park, S. (2012). The Low-Resolution CCSM4. *Journal of Climate*, 25(12), 3993–4014. doi:10.1175/jcli-d-11-00260.1
15. Tüxen, R. (1956). Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung. *Angew. Pflanzensoziol. (Stolzenau)*, 13, 5–42.

Стаття: надійшла до редакції 23.02.2019

доопрацьована 20.05.2019

прийнята до друку 06.06.2019

MODELING OF CLIMATIC FACTORS OF VEGETATION ALTITUDINAL ZONALITY IN UKRAINIAN CARPATHIANS AND ITS FUTURE CHANGES DUE TO GLOBAL WARMING

Alexander S. Mkrtchian

*Ivan Franko National University of Lviv,
P. Doroshenko St., 41, UA – 79007 Lviv, Ukraine,
e-mail: alemkrt@gmail.com*

Prospective climate changes in the current century will cause substantial shifts in the potential species habitats, in the spatial extents of communities and ecosystems, and in the areas covered by them. The present study is related to the climatic factors influencing the formation of altitude vegetation zonation in the Ukrainian Carpathians. As the borders between altitudinal belts in this area have been substantially transformed by anthropogenic activity, the method has been elaborated for the detection of the locations of natural borders, on the basis of the statistical analysis of the distribution of the altitudinal gradient of NDVI index derived from Landsat 8 remote sensing data. Thereafter the relations between the locations of these natural borders and the WorldClim bioclimatic surfaces were analyzed by means of multiple regression models.

Thus, it was revealed that the location of the boundary between nemoral and boreal altitude belts in this region is influenced mostly by minimal winter temperatures, while the location of the boundary between boreal and high-altitude treeless belts is mostly determined by the average temperatures of the warmest quarter of the year. On the basis of climatic data, the location of altitude zones of natural vegetation has been mapped, that mirror the climatic aspect of the site – the potential natural vegetation on the classification level of biome (vegetation type).

WorldClim dataset, together with actual climatic data contains the prospective climatic surfaces obtained by global climatic system modeling. Using these data allowed forecasting the changes in location and relative areas of altitude belts in the Carpathians under the influence of global warming. In the middle of this century, the areas of nemoral belts are expected to expand while the areas of boreal and high-altitude treeless belts will significantly dwindle. These two belts can totally disappear in this region by 2070.

Key words: Carpathians, altitude zonation, global warming, Landsat, WorldClim.