

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОТЕНЦІЙНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ЛІСОСТАНІВ УКРАЇНИ ПІД ВПЛИВОМ ЗМІНИ КЛІМАТУ

*Букуша Ігор Федорович, канд. с.-г. наук, с.н.с., Пивовар Тетяна Сергіївна, канд. с.-г. наук,  
с.н.с., Лялін Олександр Іванович, канд. с.-г. наук, с.н.с.*

*Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації  
імені Г. М. Висоцького*

## MODELING OF POTENTIAL FOREST PRODUCTIVITY OF UKRAINE UNDER CLIMATE CHANGE

*Buksha I. F., candidate of agricultural sciences, senior researcher, Pyvovar T. S., candidate of agricultural  
sciences, senior researcher, Lialin O. I., candidate of agricultural sciences, senior researcher*

*Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest melioration named after G. M. Vysotsky*

За літературними даними (Palamarchuk et al. 2017) середня температура в Україні зросла на 0,7°C за останнє сторіччя. Згідно з останніми прогнозами МГЕЗК (IPCC AR5, 2014) очікується подальше її зростання. Такі зміни матимуть значні впливи на природні екосистеми, і зокрема, ліси. Вплив прогнозованої зміни клімату на ліси може бути різним, залежно від природно-кліматичної зони, породного складу лісів, та локальних умов місцезростання. Зміни клімату впливають на стійкість лісів та їх здатність реагувати на мінливість кліматичних чинників (Shvidenko et al. 2018), крім того, призводять до значних змін у біологічній продуктивності (Pasternak 2011).

Для прогнозування обсягів лісових ресурсів для лісового господарства та лісопереробної промисловості, а також для проектування заходів із запобігання змінам клімату та адаптації лісів (Gebler A. et al., 2007), важливо мати достовірний прогноз продуктивності та стану лісів в середньо- та довгостроковій перспективі.

Приріст деревостанів є інтегральним показником, який певним чином характеризує реакцію дерев лісових порід до змін довкілля. Математичне моделювання широко застосовується під час дослідження лісових екосистем в цілому, а також їх продуктивності зокрема. Методи вивчення потенційної продуктивності (Lositskiy & Chuyenkov 1980) поділяють на три основні групи: кліматологічні, лісотипологічні та лісівничо-таксаційні. Кліматологічні методи визначення продуктивності засновані на залежності потенційної продуктивності від кліматичних факторів. У 1956 році шведський вчений С. С. Патерсон запропонував модель *кліматичної продуктивності рослинності CVP* (Climate Vegetation Productivity) для прогнозування максимального потенційного приросту деревини за запасом в залежності від кліматичних чинників (Paterson 1956). Використання зазначеного методу дало прийнятні результати і у останні роки у різних природно-кліматичних регіонах (Benavides et al. 2009, Diodato & Bellocchi 2020, Gao et al. 2019).

Зважаючи на те, що на території України до теперішнього часу такі дослідження не проводилися *метою наших досліджень* стало проведення моделювання потенційної продуктивності лісів України з використанням моделі CVP Патерсона за різних кліматичних сценаріїв у середньо- та довгостроковій перспективі, з урахуванням лісогосподарського зонування країни.

Розрахунки проведено за кліматичними даними, наданими фахівцями Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України в рамках дослідження «Оцінка впливу, можливостей та пріоритетів зміни клімату в Україні». Для оцінок продуктивності у минулому (1961–1990 рр.) та сучасного періодах (1990–2010 рр.) використано дані E-OBS, а для прогнозних оцінок – дані щодо майбутнього клімату за новітніми сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5 (IPCC AR5, 2014) з проєкту EURO-CORDEX. Для території України отримано понад 7 тисяч точок з кліматичними даними за всі досліджувані періоди.

Узагальнення результатів проводили у регіональному аспекті – в межах лісогосподарських областей за С. А. Генсіруком (Gensiruk et al. 1981). Зміни потенційної

продуктивності оцінювали відносно минулого клімату (1961–1990 рр.), оскільки саме для цього періоду були розроблені більшість чинних нормативів лісового господарства.

Для розрахунку індексу CVP Патерсона використано значення максимальної середньої температури найтеплішого місяця, річної суми опадів, тривалість вегетаційного сезону у місяцях; різниці між середньою місячною максимальною та мінімальною температурами, та показник  $f$ , який урахує фактичну інсоляцію через річну тривалість сонячного сйва, годин.

Тривалість вегетаційного сезону оцінювали згідно з критерієм (Benavides et al. 2009, Diodato & Bellocchi 2020, Rahman & Akter 2015), за яким вегетаційний сезон включає лише місяці з середньою температурою від 6 °C і достатньою кількістю опадів (значення індексу де Мартона вище 20). Розрахунки індексу CVP Патерсона та його складових детально наведено у відповідних фахових публікаціях (Benavides et al. 2009, Gao et al. 2019, Buksha I. F. et al. 2021).

Перевірку результатів моделювання потенційної продуктивності виконано шляхом кореляційного аналізу із середньою зміною запасу головних лісоутворюючих порід згідно з даними обліку лісів на рівні лісогосподарських областей України (Gensiruk et al. 1981). Статистичний аналіз виконано за допомогою програми IBM SPSS Statistics.

З метою оцінки фактичної продуктивності лісів проведено узагальнення середніх лісотаксаційних показників головних лісоутворювальних порід: сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.), дуба звичайного (*Quercus robur* L.) (вегетативного та насінневого походження), бука лісового (*Fagus sylvatica* L.), ялини європейської (*Picea abies* (L.) Karst.), берези повислої (*Betula pendula* Roth), вільхи чорної (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) та граба звичайного (*Carpinus betulus* L.). за даними повидільної бази даних «Лісовий фонд» станом на 01.01.2011 р. До аналізу включено всі деревостани вищеназваних порід за умови участі у складі насадження від 3 одиниць й вище. Запас деревостанів перераховували на чисті деревостани (за часткою породи у складі) і розраховували середньозважений середній запас на гектарі, середньозважений вік деревостанів за породами тощо (Myronyuk et al. 2017).

Отримані значення потенційної продуктивності (PP) за Патерсоном (Paterson 1956) за сценаріями змін клімату в розрізі лісогосподарських областей України (табл.) показали, що у базовому періоді (1961-1990 рр.) лісогосподарські області достовірно різнилися за потенційною продуктивністю: з максимумом у Карпатах (5,8 м<sup>3</sup>/га/рік) і мінімумом у Південному Степу (0,2 м<sup>3</sup>/га/рік), середня потенційна продуктивність по країні дорівнювала близько 4 м<sup>3</sup>/га/рік. За значенням потенційної продуктивності лісостанів у міру її зменшення лісогосподарські області утворюють наступний ряд: Карпати, Полісся, Правобережний Лісостеп, Лівобережний Лісостеп, Гірський Крим, Північний Степ, Південний Степ.

**Таблиця** – Значення середньої потенційної продуктивності лісостанів у лісогосподарських областях (м<sup>3</sup>/га/рік)

Часовий період/ сценарій	Карпати	Полісся	Право- бережний Лісостеп	Ліво- бережний Лісостеп	Гірський Крим	Північний Степ	Південний Степ	Україна
1961-1990	5,81±0,05	4,93±0,01	4,57±0,09	3,59±0,21	2,46±0,51	2,00±0,11	0,19±0,07	3,96±0,1
1991-2010	5,78±0,05	5,23±0,02	5,03±0,08	4,43±0,07	3,39±0,29	2,46±0,22	0,14±0,06	4,32±0,1
2021-2040/RCP 4,5	6,08±0,04	5,51±0,02	5,26±0,08	4,69±0,05	3,91±0,26	2,98±0,21	0,39±0,13	4,62±0,1
2041-2060/ RCP 4,5	6,16±0,04	5,48±0,03	5,21±0,09	4,59±0,06	3,90±0,24	2,35±0,19	0,54±0,18	4,53±0,1
2081-2100/ RCP 4,5	6,29±0,04	5,49±0,03	5,18±0,11	4,19±0,09	4,12±0,20	2,17±0,17	0,91±0,18	4,51±0,1
2021-2040/ RCP 8,5	6,09±0,04	5,46±0,02	5,23±0,07	4,65±0,05	3,55±0,28	2,62±0,22	0,27±0,12	4,53±0,1
2041-2060/ RCP 8,5	6,29±0,04	5,54±0,03	5,11±0,1	4,61±0,05	3,74±0,28	2,41±0,22	0,56±0,15	4,55±0,1
2081-2100/ RCP 8,5	7,00±0,05	6,55±0,04	6,17±0,1	5,31±0,09	4,02±0,14	3,18±0,12	1,48±0,17	5,42±0,1

Різниця даних за зазначеними сценаріями в межах кожної лісогосподарської області виявилася достовірною ( $p < 0,01$ ).

У сучасному кліматі (1991-2010 рр.) порівняно з базовим періодом відбулося збільшення середнього значення потенційної продуктивності лісів для країни (на 0,3 м<sup>3</sup>/га/рік), яке відмічено для більшості лісогосподарських областей рівнинної частини (Полісся до 5,2 м<sup>3</sup>/га/рік, Правобережний Лісостеп до 5 м<sup>3</sup>/га/рік та Лівобережний Лісостеп

до 4,4 м<sup>3</sup>/га/рік у). Разом із тим у Південному степу відбулося зменшення значень показника, а продуктивність лісів у Карпатах у сучасному кліматі змінилася несуттєво.

За обома сценаріями спостерігається тенденція до продовження поступового росту потенційної продуктивності лісів, однак характер змін буде різнитися залежно від часового періоду та сценарію. Подібну тенденцію до збільшення значень потенційної продуктивності за кліматичними сценаріями показали дослідження в Італії (Diodato & Bellocchi 2020), Іспанії (Benavides et al. 2009), Китаї (Gao et al. 2019) та Бангладеш (Rahman & Akter 2015).

До середини сторіччя за сценарієм RCP 4,5 потенційна продуктивність лісів в Україні відносно базового кліматичного періоду зросте на 14,4%, за RCP 8,5 – на 14,9%.

Так, за кліматичним сценарієм RCP 8,5 значення РР зростатиме протягом сторіччя в усіх лісогосподарських областях: у цілому для України в найближчому майбутньому та в середині сторіччя РР становитиме 4,5 м<sup>3</sup>/га/рік, а наприкінці сторіччя сягне 5,4 м<sup>3</sup>/га/рік. Суттєві зміни очікуються в Південному Степу, однак внаслідок дефіциту вологості для більшості періодів у регіоні буде низька продуктивність лісів. Суттєве збільшення потенційної продуктивності лісів наприкінці сторіччя пов'язані як із істотним зростанням температури повітря, рівня опадів, а також із збільшенням тривалості вегетаційного сезону.

За RCP 4,5 значення РР зростатимуть меншою мірою: найбільші зміни прогнозують у найближчому майбутньому (РР = 4,6 для України), а потім потенційна продуктивність дещо знизиться (до 4,5 м<sup>3</sup>/га/рік), однак значення перевищуватимуть показники базового періоду та сучасного клімату. За лісогосподарськими областями найбільші зміни відбудуться в Карпатах, Гірському Криму та Південному Степу.

Причиною росту біопродуктивності згідно з даними (Kaufmann et al. 2011, Woolf et al. 2016) є збільшення активності фотосинтезу при збільшенні температури та концентрації CO<sub>2</sub>, однак такий позитивний ефект нівелюється катастрофічними наслідками від збільшення частоти та інтенсивності несприятливих погодних явищ, та спалахів шкідників і хвороб. Крім того, за даними дослідження (Spathelf et al. 2014) ріст фактичної продуктивності слід очікувати лише у місцях з достатнім зволоженням.

У підсумку зазначимо, що проведені розрахунки показника потенційної продуктивності лісів за моделлю (індексом) Патерсона дозволили встановити закономірності динаміки продуктивності лісів у розрізі лісогосподарських областей та природних зон України для минулого, сучасного та майбутніх часових періодів. Таким чином у сучасному кліматі, порівняно з базовим кліматичним періодом 1961-1990 рр., збільшились значення потенційної продуктивності – в середньому на 0,3 м<sup>3</sup>/га/рік (на 7,5%). За обома сценаріями зміни клімату (RCP 4,5 та RCP 8,5), тенденція до збільшення потенційної продуктивності матиме місце і в майбутньому, однак характер змін буде різним залежно від сценарію та часового періоду: за сценарієм RCP 4,5 до середини сторіччя потенційна продуктивність зросте на 14,4%, за сценарієм RCP 8,5 – на 14,9% (до базового кліматичного періоду); наприкінці сторіччя ці зміни становитимуть сягнуть 13,9% та 36,9%, відповідно.

Використання індексу Патерсона в умовах зміни кліматичних показників дозволяє прогнозувати динаміку потенційної продуктивності лісів в Україні під впливом зміни клімату на рівні окремих природних зон та лісогосподарських областей. Втім для отримання більш точних прогнозів для окремих лісогосподарських підприємств необхідно враховувати едафічні, типологічні та таксаційні характеристики лісів, а також біотичні фактори, що суттєво впливають на продуктивність і стан лісів на локальному рівні.

#### **Список посилань**

1. Gebler, A., Keitel, C., and Kreuzwieser, J. [et al.]. 2007. Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate (Review) / *Trees-Structure and Function*. N 21 (1). P. 1–11.
2. Palamarchuk, L. V., Hnatiuk, N. V., Krakovska, S. V., Shedemenko, I. P. and Diukel, H. O. 2010. Sezonni zminy klimatu v Ukraini v XXI stolitti [Seasonal climate change in Ukraine in XXI century] *Naukovi pratsi Ukrainського naukovo-doslidnoho hidrometeorologichnoho instytutu* [Scientific works of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute], 259: 104–120 (in Ukrainian).

3. Shvidenko, A. Z., Buksha, I. F., and Krakovska, S. V. Urazlyvist' lisiv Ukrayiny do zminy klimatu [Vulnerability of Ukranian forests to climate change]: Monograf. Kyiv: Nika-Center, 2018. 184 p.
4. Pasternak, V. P. Bioproduktyvnist lisiv pivnichnoho skhodu Ukrayiny v konteksti zmin klimatu [Bioproductivity of forests of the northeast of Ukraine in the context of climate change]: author's ref. dis. for science. degree of Dr. s.-g. Science: special. 06.03.02 "Forest management and forest mensuration" and 06.03.03 "Forestry and Silviculture". Kyiv, 2011. 46 p.]: Kyiv, 2011. 46 p.
5. Lositskiy, K. B. and Chuyenkov, V. S. 1980. Etalonnnyye lesa [Reference forest stands]. M.: Lesn.prom-st'. 192 p.
6. Shvidenko, A. Z., Shchepashchenko, D. G., Nilsson S., and Buluy, Yu. I. 2008. Tablitsy i modeli khoda rosta i produktivnosti nasazhdeniy osnovnykh lesoobrazuyushchikh porod Severnoy Yevrazii (normativno-spravochnyye materialy). [Tables and models of growth and productivity of forests of major forest forming species of Northern Eurasia (standard and reference materials)] Eddition 2, dop. M.: Federal'noye agentstvo lesnogo khozyaystva, 886 p.
7. Benavides, R., Roig, S., and Osoro, K. 2009. Potential productivity of forested areas based on a biophysical model. A case study of a mountainous region in northern Spain. *Annals of Forest Science*, Springer Verlag/EDP Sciences, 66 (1), p.1. DOI: 10.1051/forest/2008080.
8. Diodato, N. and Bellocchi, G. 2020. Spatial probability modelling of forest productivity indicator in Italy. *Ecological Indicators*, Elsevier, 108, ff10.1016/j.ecolind.2019.105721ff. ffhal-02320568ff. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105721>.
9. Gao, W-Q., Lei, X.-D., and Fu, L.-Y. 2019. Impacts of climate change on the potential forest productivity based on a climate-driven biophysical model in northeastern China. *J. For. Res.* <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00999-6>.
10. IPCC AR5. 2014. Climate Change 2014. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Technical Summary, WG AR5, 36. Data Distribution Centre. URL: [http://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5\\_scenario\\_process/RCPs.html](http://sedac.ciesin.columbia.edu/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html)
11. Myronyuk, V. V., Svinchuk, V. A., and Lyalin, O. I. 2017. Synopsis of lectures on the subject "Forest Taxation". Kharkiv: O. M. Beketov NUUE. 99 p. (in Ukrainian).
12. Paterson, S. S. 1956. The forest area of the world and its potential productivity, Royal University of Göteborg, Göteborg. 1956. 216 p.
13. Gensiruk, S. A., Shevchenko, S. V., Bondar, V. S. et al. 1981. Integrated forestry zoning of Ukraine and Moldova. Kyiv, Naukova dumka, 360 p. (in Russian).
14. Buksha I. F., Pyvovar T. S., Pasternak V. P., Buksha M. I., Lialin O. I., Buksha T. I. Application of the Paterson model to assess climate change impact on the potential productivity of Ukrainian forests. *Forestry & Forest Melioration*. 137. 2021. [in press]. (in Ukrainian).
15. Rahman, M. S. and Akter, S. 2015. Climate to Forest Productivity: Implication of Paterson's CVP Index. *Research Journal of Forestry* 9 (2): 27-34. DOI: 10.3923/rjf.2015.27.34.
16. Kaufmann, R. K., Kauppi, H., Mann M. L., and Stock, J. H. 2011. Reconciling Anthropogenic Climate Change with Observed Temperature 1998–2008. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, no. 29: 11790–11793. doi:10.1073/pnas.1102467108.
17. Spathelf, P. & van der Maaten, E. & van der Maaten-Theunissen, M. & Campioli, M. & Dobrowolska, D. 2014. Climate change impacts in European forests: The expert views of local observers. *Annals of Forest Science*. 71. 131-137. DOI: 10.1007/s13595-013-0280-1
18. Woolf, D. K., Land, P. E., Shutler, J. D., Goddijn-Murphy, L. M., and Donlon, C. J. 2016. On the calculation of air - sea fluxes of CO<sup>2</sup> in the presence of temperature and salinity gradients, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 1229– 1248, doi:10.1002/2015JC011427.